



Análisis de las condiciones hidrodinámicas en una playa micromareal intermedia reflejante: Caso de estudio Costa Verde, Magdalena

Roy Enrique Marengo Barranco

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla, Colombia

2020

Análisis de las condiciones hidrodinámicas en una playa micromareal intermedia reflejante: Caso de estudio Costa Verde, Magdalena

Roy Enrique Marengo Barranco

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Geólogo

Director (a):
PhD Luis Jesús Otero Díaz

Línea de Investigación:
Hidrodinámica Costera

Universidad del Norte
Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias
Barranquilla, Colombia
2020

A mi familia

Agradecimientos

En primer lugar, quiero darle las gracias a mi familia que me brindaron su apoyo incondicional y han sido fuente de motivación a pesar de las circunstancias.

A mi mentor en este camino de la oceanografía, PhD. Luis Otero, quien además de dirigir este proyecto, se ha tomado el trabajo de guiarme en este mundo de la oceanografía, por inspirarme en la profundización de esta ciencia, y trasmitirme la pasión por las ciencias del mar.

A los otros docentes del programa de Geología de la Universidad del Norte, por guiarme en esto que ha sido un camino difícil y que comienza a rendir frutos.

Resumen

Desde hace décadas el ser humano ha concebido las zonas costeras como un punto de diversas importancias, que se ha visto modificada por agentes antrópicos o aumento del nivel mar, ocasionando que sus condiciones de equilibrio sean afectadas. Esto ha originado que en los últimos años haya un mayor interés por reconocer y predecir esos factores que generan los cambios en la geometría y forma de la zona costera. Por ello, con el uso de dos series de tiempo de 40 años de datos e información recolectada en campañas de campo de la playa de Costa Verde (Magdalena), se aplicó el modelo SWASH para la generación de distintos estados de mar con el fin de obtener varios escenarios para una completa caracterización de la zona. De las series de tiempo y con el uso del número de Iribarren se encuentra que la rotura de oleaje de las playas de Costa Verde es tipo descrestamiento y voluta. El parámetro adimensional de velocidad de caída del sedimento determina que la playa es intermedia reflejante con barras de canaleta, asociadas a características morfológicas como patrones rítmicos en la línea de costa (cusps) y pequeñas corrientes de retorno. Con base en los resultados de la modelación, se ha aplicado análisis de Fourier y transformada de Wavelet permitiendo identificar los niveles de contribución de las ondas gravitatorias e infragravitatorias (IG) en la evolución de la superficie libre (η), la velocidad transversal (u) y longitudinal (v). Adicionalmente, con el uso de la coherencia espectral y la transformada cruzada de wavelet entre los tres parámetros (η , u y v) analizados, para condiciones normales, se identificó la presencia de Standing Leaky Waves y Standing Edge Waves, no obstante, cuando se modifican estas condiciones se destaca la presencia de Progressive Leaky Waves y Progressive Edge Waves. Finalmente, estos resultados permiten inferir porque se podrían estar desarrollando las características morfológicas de esta playa en cuanto a la presencia de patrones rítmicos a lo largo de toda su línea costera.

Palabras clave: Onda Infragravitatoria, análisis de Fourier, transformada de Wavelet, superficie libre, velocidad transversal y velocidad longitudinal.

Abstract

For decades, the human being has exploited coastal areas, which consequently have been affected by anthropic agents or rising sea levels, thus altering their equilibrium conditions. In recent years, this has led to a greater interest in recognizing and predicting those factors that generate changes in geometry and shape of coastal zones. In this work, the numerical tool SWASH was applied for the generation of different sea states in order to obtain various scenarios intending for a complete characterization of Costa Verde beach, in Magdalena, Colombia, by using two 40-year time series of data and information collected on-site. First, by means of the time series and the use of the Iribarren number, it was determined that the wave breaking of Costa Verde beach is of spilling and plunging type. Furthermore, by the use of the dimensionless fall velocity of sediments, it was found out that the beach under study is intermediate - reflective, and with gutter bars, associated with morphologic characteristics such as rhythmic patterns on the coastline (cusps) and small rip currents. Moreover, based on the modeling results, Fourier analysis and Wavelet transform were applied, which led to the identification of the contribution levels of gravitational, and infragravitational waves (IG) in the evolution of the free surface (η), the cross-shore (u) and alongshore (v) velocities. Subsequently, via the coherence spectra and cross-wavelet transform (XWT) between the three analyzed parameters, i.e. η , u , and v , for normal conditions, the presence of Standing Leaky Waves and Standing Edge Waves was identified. Nevertheless, when these conditions were modified and the calculations were performed all over again, Progressive Leaky Waves and Progressive Edge Waves were present instead. Finally, the afore-mentioned results allow us to infer why these specific morphologic characteristics are being developed in Costa Verde beach, concerning the presence of rhythmic patterns along the coastline

Keywords: Infragravity waves, Fourier analysis, Wavelet transform, Free surface, Cross-shore velocity and alongshore velocity.

Contenido

1. Introducción	2
2. Planteamiento del problema.....	5
3. Objetivos	7
3.1 Objetivo General	7
3.2 Objetivos Específicos.....	7
4. Área de estudio	8
5. Datos y Métodos	11
6. Resultados	19
6.1 Clima Marítimo.....	19
6.1.1 Aguas profundas.....	19
6.1.2 Aguas someras	21
6.1.3 Régimen Extremal.....	24
6.2 Tipo de Rotura y Estado Morfodinámico Modal	26
6.3 Resultados Modelo SWASH.....	28
6.3.1 Evolución de la superficie libre.....	28
6.3.2 Análisis espectral de la superficie libre y las velocidades transversales y longitudinales.....	30
6.3.3 Análisis del oleaje con la Transformada Continua de Wavelet.....	48
7. Discusiones	58
8. Conclusiones	62
9. Referencias.....	65

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Ubicación de las playas de Costa Verde.....	8
Figura 2: Ubicación de las boyas de medición.....	11
Figura 3: Coeficientes de correlación para H_{mo}	13
Figura 4: Coeficientes de correlación para las velocidades orbitales U_{rms} y V_{rms}	14
Figura 5: Comparativo de datos medidos y datos modelados para H_s , U y V	15
Figura 6: Serie de tiempo de 1979 a 2018 de la zona de aguas profundas.....	19
Figura 7: Rosa de oleaje de la zona de aguas profundas.....	20
Figura 8: Distribución de probabilidad acumulada e histograma de H_s en aguas profundas.....	21
Figura 9: Serie de tiempo de 1979 a 2017 de la zona de aguas someras	22
Figura 10: Rosa de oleaje de la zona de aguas someras.....	22
Figura 11: Distribución de probabilidad acumulada e histograma de H_s en aguas someras.....	24
Figura 12: Registro histórico de máximos anuales de H_s desde 1979 a 2018.....	25
Figura 13: Histograma de tipo de rotura del oleaje en aguas profundas.....	26
Figura 14: Histograma de tipo de rotura del oleaje en aguas someras.	27
Figura 15: Histograma del tipo de estado morfodinámico de la playa.	28
Figura 16: Evolución de la superficie libre desde costa afuera hacia aguas someras	29
Figura 17: Entrada del oleaje a las playas de Costa Verde.....	29
Figura 18: Espectro de la superficie libre para las condiciones normales en Costa Verde.....	30
Figura 19: Espectro de velocidad transversal para condiciones normales en Costa Verde	31
Figura 20: Espectro de velocidad longitudinal para condiciones normales en Costa Verde.....	32
Figura 21: Comparación de espectros de energía de la superficie libre variando T_p vs Dirección y H_s	33
Figura 22: Comparación de espectros de energía de la velocidad transversal variando T_p vs Dirección y H_s	36
Figura 23: Comparación de espectros de energía de la velocidad longitudinal variando T_p vs Dirección y H_s	39
Figura 24: Comparación de espectros de energía de la superficie libre variando Dirección vs H_s y T_p	43
Figura 25: Comparación de espectros de energía de u variando Dirección vs H_s y T_p	45
Figura 26: Comparación de espectros de energía de v variando Dirección vs H_s y T_p	47
Figura 27: Espectro de wavelet para η , u y v en S1 y S2.	49
Figura 28: Espectro de wavelet para η , u y v en S3 y S4.	49
Figura 29: Espectro de wavelet para η , u y v en S5.....	50

Figura 30: Espectros de correlación cruzada (a, b y c) y análisis de coherencia (d, e y f) para el punto S2.	51
Figura 31: Espectros de correlación cruzada y análisis de coherencia para el punto S3.	52
Figura 32: Espectro de wavelet para η , u y v variando el periodo pico.	53
Figura 33: Comparación de espectros de correlación cruzada para variación de periodo pico	54
Figura 34: Espectro de wavelet para η , u y v variando dirección de incidencia del oleaje	55
Figura 35: Comparación de espectros de correlación cruzada para variación en la dirección de incidencia del oleaje.	56

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1: Índices de BIAS y Rms para los tres parámetros evaluados	14
Tabla 2: Estadísticos básicos de Hs en zona de aguas profundas	20
Tabla 3: Estadísticos básicos de Hs en zona de aguas someras	23
Tabla 4: Valores máximos de Hs por año.....	25

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
I_r	Número de Iribarren	adimensional	Ec. 5.1 y Ec. 5.2
L_o	Longitud de Onda en aguas profundas	m	Ec. 5.1 y Ec. 5.2
Hz	Hertz	s^{-1}	
C°	Grados Celsius	$^{\circ}$	
m	Pendiente de la playa	adimensional	Ec. 5.1 y Ec. 5.2
H_o	Altura de ola en aguas profundas	m	Ec. 5.1
H_b	Altura de ola en rotura	m	Ec. 5.2
w	valor medio de la velocidad de caída del grano del sedimento característico de la playa	adimensional	Ec. 5.3
T	Periodo del oleaje	s	Ec. 5.3
H	Altura del oleaje	m	Ec. 5.3
u	Velocidad Transversal	m/s	
v	Velocidad Longitudinal	m/s	
H_{mo}	Altura Significante Espectral	m	
m_o	Momento cero		Ec. 5.4
U_{rms}	Velocidad Transversal Orbital	m/s	Ec. 5.5
V_{rms}	Velocidad Longitudinal Orbital	m/s	Ec. 5.6
H_s	Altura Significante de Ola	m	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Ω	Parámetro adimensional de caída de sedimento	adimensional	Ec. 5.3
η	Superficie Libre		

1. Introducción

Las zonas costeras se describen como el área del litoral, que comprende desde las dunas costeras hasta un punto del perfil de playa en que se empieza a ver afectada por la presencia del oleaje (Silva-Casarín et al., 2011). Esta demarcación tan amplia y con la presencia de factores como olas, vientos y mareas, la hacen uno de los lugares con mayor dinamismo activo que existe en la naturaleza, en especial, la franja correspondiente a la zona de rompientes, donde se normaliza el proceso de rotura. En este lugar, la energía del oleaje se empieza a disipar y como producto de la rotura del oleaje y la fricción con el fondo se genera turbulencia, que posteriormente se transforma en tres grandes fenómenos: Ondas cortas y largas, variaciones del nivel medio y generación de corrientes.

Este estado dinámico de las costas genera una serie de procesos costeros que tienen una incidencia directa en los procesos de erosión o acreción en las playas, puesto que el transporte de sedimentos está estrechamente ligado con las condiciones hidrodinámicas de la zona (Silva-Casarín et al., 2017). Por ello, es necesario estudiar dichos factores que tienen una repercusión en la transformación de las playas como: oleaje, vientos, corrientes, nivel del agua y deriva costera. El estudio de estas variables como por ejemplo el Oleaje, al cual se le pueden hacer análisis de altura, periodos y direcciones son un primer paso para cuantificar estas características y posteriormente introducirlas en un modelo numérico con el fin de obtener resultados que permitan inferir sobre los procesos involucrados en la dinámica de la playa. Una herramienta para evaluar el estado dinámico de las playas es entender el tipo de energía que llega a ella.

Se han llevado a cabo varios estudios para explicar la dinámica del oleaje en la zonas costeras (Putnam & Johson, 1949; Shin et al, 2014), donde se ha hecho énfasis en entender que mucha de la energía que llega a las costas en principio proviene del oleaje gravitatorio con frecuencias de oscilación mayores a 0.04 Hz (Ruiz-Merchán et al, 2019) y que durante el proceso de rotura, parte de la energía total se disipa pero otra se transforma en turbulencia y oleaje infragravitatorio con frecuencias inferiores a 0.04 Hz. El cambio de frecuencia está asociado a procesos lineales y no

lineales de transferencia de energía (Hasselmann, 1962) que, sumado a la influencia de la fricción del fondo, los cambios en la batimetría y la irregularidad de la morfología hacen de la dinámica de las playas en aguas someras un tema muy complejo de estudiar (Wright & Short, 1984 ; Komar & Holman, 1986).

Entender cada vez mejor las condiciones hidrodinámicas de las zonas costeras ayudará a formular de una manera más idónea la predicción del estado morfodinámico de una playa (Vidal, et al, 1995). Además, permitirá comprender o estimar cómo se puede dar el proceso de evolución de las condiciones normal ante un eventual cambio atípico por la presencia de eventos extremos. Tener claro estas condiciones o poder predecirlas ha sido de interés para anteriores autores desde el siglo pasado como: (Sonu,1968; Kraus et al, 1991; Hashimoto, 1971 y Wright & Short, 1984), quienes estuvieron formulando modelos tridimensionales de evolución de playas. A estos se le suman otras investigaciones como el mejoramiento en el análisis del oleaje que empezó con (Rice, 1944) y (Pierson & Marks, 1952) y posteriormente se fue avanzando con la inclusión de análisis espectrales (Newland, 1984) y modelos de generación como los de (Massel, 1996 y Ochi, 1998).

Es así como la particularidad de realizar los análisis hidrodinámicos ha empezado a tomar mucha fuerza puesto que se tiene la certeza que los procesos físicos que generan cambio en las zonas costeras están indudablemente ligados a los problemas hidrodinámicos de la zona, tales como predecir el oleaje, las corrientes, las velocidades orbitales, entre otras. Además, que el constante aumento anual del nivel del mar a lo largo de todas las costas del mundo le ha incrementado aún más la importancia de reconocer e intentar predecir cuales son los efectos a corto, mediano y largo plazo que pueden tener todas estas condiciones al actuar constantemente en la playa. Por ello, la conservación y protección de una playa pasa por un mejor entendimiento de los procesos morfodinámicos de la playa y la hidrodinámica es uno de esos dos insumos para comprenderla mejor. En este caso específico de la zona de estudio en la playa de Costa Verde del municipio de Ciénaga (Magdalena), se conocen dos trabajos realizados por (Guerrero Peña, 2017), donde se realiza una clasificación morfológica e hidrodinámica de las playas del caribe colombiano, además de observaciones de campo de las características del oleaje y las corrientes en estas playas (Ruiz-Merchán et al, 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se busca conocer con mayor profundidad las características hidrodinámicas de una playa micromareal intermedia reflejante, tomando como caso de estudio la playa de Costa Verde (Magdalena), con el fin de entender de mejor manera la relación

hidrodinámica-morfología de este tipo de playas y así conocer los distintos estados de su posible evolución dependiendo de las condiciones a las que esté sometida.

2. Planteamiento del problema

Desde hace décadas el ser humano ha concebido las zonas costeras como un elemento con diversas importancias. Se destaca la costa como un elemento de defensa natural, como una zona de desarrollo de las ciudades costeras, como un eje en el desarrollo de los ambientes naturales que nacen alrededor de ella, como un hábitat natural y como un área generadora de recursos. No obstante, dado el gran dinamismo que se desarrolla en estos lugares, a la intensa intervención antrópica en ellas o al aumento del nivel mar, en ocasiones, estas zonas litorales sufren cambios muy marcados de su perfil de equilibrio en escalas de tiempo muy pequeñas, ocasionando que se genere incertidumbre en la tendencia general de la playa, por ejemplo, si está sufriendo procesos de erosión normales o por encima del promedio.

Dado el incremento de playas alrededor del mundo en que sus tasas de erosión se encuentran por encima de la condiciones normales (Bruun, 1954; Hanson & Kraus, 2011; Komar & Holman, 1986), ha ocasionado que investigadores planteen diversos modelos numéricos con el fin de cuantificar, reconocer y predecir las fuerzas que afectan la geometría y generan los cambios en las zonas costeras. De estas investigaciones y modelaciones se han obtenido resultados que han permitido caracterizar las fuerzas y fenómenos que inciden en las playas. Con estas caracterizaciones se ha podido cuantificar que fuerzas generadas por el oleaje o por corrientes inducidas afectan enormemente en las condiciones de la playa, permitiendo predecir los escenarios a los que estará sometida la playa y analizar con mayor detalle que pueda sucederle a la costa si esas condiciones se mantienen.

Esta serie de estudios que se han venido realizando desde el siglo XX con los inicios del análisis del oleaje (Rice, 1944; Kinsman, 1965; Phillips, 1977; Massel, 1996) hasta llegar a modelos tridimensionales de evolución de playas (Sonu, 1968; Wright & Short, 1984; Vidal et al, 1995) han permitido evidenciar, por ejemplo, que para predecir el estado morfodinámico de una zona costera o playa, es necesario conocer sus condiciones hidrodinámicas y morfológicas. Por ello, reconocer las condiciones hidrodinámicas de la playa micromareal intermedia reflejante de Costa Verde (Ruiz-Merchán et al, 2019) en el municipio de Ciénaga (Magdalena) y poder analizarlas, será fundamental

para interpretar mejor los procesos costeros que en ella se desarrollan y ver el grado de influencia de cada uno de ellos en la geometría que tiene la playa.

Los estudios recientes desarrollados por (Guerrero Peña, 2017) y (Ruiz-Merchán et al, 2019) han ayudado a entender mejor las condiciones morfológicas e hidrodinámicas presentes en una playa de tipo intermedia reflejante con régimen de micromarea. A pesar que, han sido trabajos valiosos y se han conseguido resultados innovadores, los análisis llevados a cabo han sido limitados en espacio y tiempo, debido a que se han basado en el procesamiento de datos recolectados en campo durante un máximo de tres días en donde no se alcanzan a registrar todas las posibles condiciones de clima marítimo de la zona. De manera que, con este trabajo de grado, partiendo de una serie de tiempo con un horizonte de 40 años de datos de series de estado de mar, tanto en aguas profundas como en aguas someras y del análisis de los resultados de un modelo numérico no hidrostático (SWASH) (Zijlema, M et al, (2011)), previamente calibrado, se buscará aportar a un mejor conocimiento de las condiciones hidrodinámicas de esta zona litoral y buscando dar respuesta a los siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son las condiciones hidrodinámicas presentes en distintos escenarios de clima marítimo en una playa de régimen micromareal intermedia reflejante como es el caso de la playa de Costa Verde?
- ¿Cómo es la relación hidrodinámica-morfología en este tipo de playas, en diferentes escenarios de clima marítimo?

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Analizar las condiciones hidrodinámicas y su relación con la morfología en distintos escenarios de clima marítimo para una playa micromareal intermedia reflejante a partir de los resultados de un modelo numérico no hidrostático.

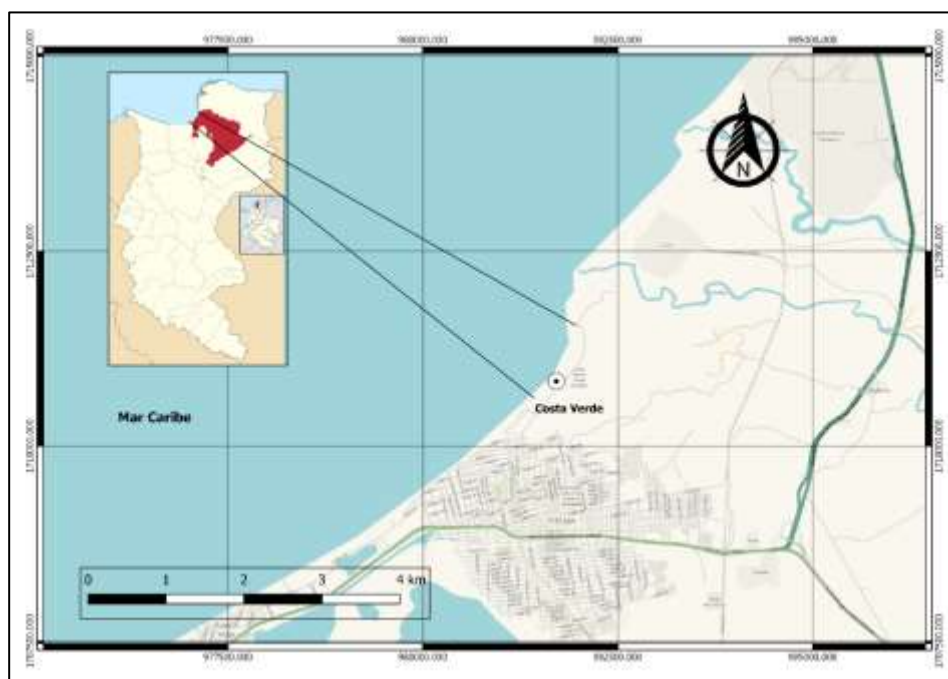
3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones medias y extremas de la altura significativa de ola y periodo pico tanto en aguas profundas como en aguas someras.
- Establecer el tipo de rotura del oleaje en la playa de Costa Verde a través del número de Iribarren, como indicador de la relación morfología e hidrodinámica.
- Establecer el tipo morfodinámico más frecuente de la playa de Costa Verde a partir del parámetro adimensional de velocidad de caída del sedimento.
- Identificar el tipo de ondas infragravitatorias presentes en la playa utilizando la Transformada Continua de Wavelet.

4. Área de estudio

La playa de Costa Verde se encuentra localizada al Noreste del municipio de Ciénaga, Magdalena (Figura 1), parte central de las costas del Caribe Colombiano con coordenadas aproximadas de latitud 11.0240152° y longitud -74.245584° .

Figura 1: Ubicación de las playas de Costa Verde



El contexto climatológico en esta zona se caracteriza por la presencia de dos estaciones. Una época seca que va de Diciembre a Abril y una época de invierno o lluviosa que va de Abril a Noviembre. No obstante, esta época lluviosa se encuentra interrumpida entre Junio y Julio por la presencia de un fenómeno meteorológico conocido como Veranillo de San Juan (Poveda, 2004). Las condiciones climáticas también se ven afectadas por la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) producto del ciclo anual de temperaturas superficiales y que constituye el mecanismo de mayor importancia a la hora de explicar las condiciones hidroclimatológicas de Colombia (Poveda, 2004), además también se ve afectada por los vientos Alisios a lo largo del año (Restrepo et al, 2012 ; Kjerfve, 1981). En cuanto a precipitación, de la estación pluviométrica que tiene el IDEAM en Tasajera (Magdalena) se obtiene un acumulado anual promedio por debajo de los 100 mm. La velocidad del viento y la temperatura superficial del mar en esta zona también están enmarcadas con las dos épocas, mientras que en época seca las magnitudes oscilan entre 2,95-10,53

m/s y 26,79-29,48 °C en época lluviosa los valores se encuentran entre 0,37-6,51 m/s y 27,53-30,71°C. (Ricaurte-Villota & Bastidas-Salamanca, 2017).

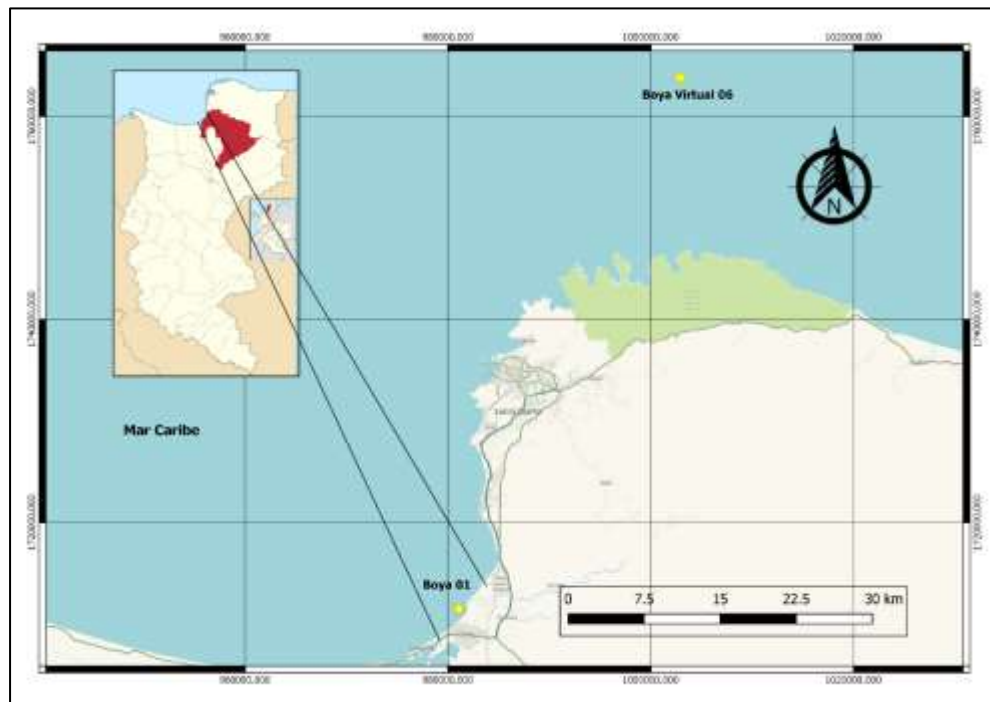
En cuanto a las características morfológicas y sedimentológicas de la playa, se tiene que su perfil longitudinal se encuentra dividido en dos partes, la primera tiene una pendiente en inmediaciones al frente de playa (foreshore) de 0.032 que se extiende aproximadamente hasta los 50 m y a partir de allí el fondo del mar reduce su pendiente con un valor aproximado de 0.0015 (Ruiz-Merchán et al, 2019). El tipo de material en esta playa es en promedio arenas gruesas y medias con un tamaño de grano entre 0.5 y 1 mm (Ricaurte-Villota & Bastidas-Salamanca, 2017).

El contexto oceanográfico de la playa se destaca por presentar un oleaje que en aguas profundas proviene principalmente de Este-Noreste (ENE), con una probabilidad de ocurrencia del 73%, aunque también hay una incidencia importante que viene NE con una ocurrencia del 24% y en inmediaciones a la playa, el oleaje proviene de NNW, con una probabilidad del 97%. En cuanto a la altura del oleaje significativo, se tienen unas condiciones medias de altura en aguas profundas de 1.48 m con periodos pico que oscilan entre 6-8 s y en aguas someras muy cercano a la playa se tiene un valor de altura medio de 0.51 m (Ruiz-Merchán et al., 2019). En cuanto al régimen de marea, en promedio esta playa tiene rangos de cambio periódico del nivel del mar entre 20 cm y 30 cm, y en algunas ocasiones excede los 50 cm, esto permite clasificarla en Micromareal. (Restrepo et al, 2012; García et al, 2011).

5. Datos y Métodos

La serie de tiempo de los datos de oleaje implementadas para la caracterización oceanográfica de las condiciones medias y extremas de la zona, se obtuvieron de dos boyas: 1) La Boya Virtual de reanálisis del programa Wavewatch III de la NOAA (Tolman, 1997, 1999 & 2009) que se encuentra en la zona offshore de Costa Verde (11,5°N y 74°W) y cubre un periodo de tiempo entre Febrero-1979 y diciembre-2018. 2) La Boya 01 que se encuentra en cercanías a la playa de Costa Verde y cubre un periodo entre Enero-1979 hasta Marzo-2017, es el resultado de la propagación realizada con el modelo espectral de oleaje SWAN desde aguas profundas hasta aguas someras de acuerdo con lo establecido por (Ruiz- Merchán et al, 2019). Ambas boyas tienen una resolución temporal de toma de datos de cada 3 horas.

Figura 2: Ubicación de las boyas de medición



A estas series de tiempo se le hizo un análisis de clima marítimo con el uso de un sistema de cómputo numérico, que para este trabajo ha sido el programa MATLAB , donde se han ejecutado una serie de códigos de programación y paralelo a ello, se ha utilizado un software de Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (AMEVA) (Castellanos et al., 2012) con el fin de reconocer el régimen medio y extremo de la altura de ola significativa tanto a nivel offshore como en cercanías a la playa. Para la boya de aguas profundas, se tomó la información directamente y no fue necesario un reprocesamiento mientras que para el caso de la boya de aguas someras debió ser propagada la serie de oleaje con el uso del modelo SWAN previamente calibrado (Ruiz-Merchán et al., 2019).

Una vez obtenido las condiciones medias y extremas de la altura de ola significativa y periodo pico, se busca establecer el estado morfodinámico más frecuente de la playa, a través de la obtención del tipo de rotura del oleaje con el uso del número de Iribarren y el parámetro adimensional de velocidad de caída del sedimento. Para el caso del número de Iribarren, este es un índice universalmente aceptado en el estudio de las zonas de rompientes (Iribarren & Nogales, 1949) y está dado por:

$$I_r = \frac{m}{\frac{H_0}{L_0}} \text{ Número de Iribarren en aguas profundas. (Ec. 5.1)}$$

$$I_r = \frac{m}{\frac{H_b}{L_0}} \text{ Número de Iribarren en aguas someras. (Ec. 5.2)}$$

Donde m es la pendiente de la playa, H_0 es la altura de ola en aguas profundas, L_0 es la longitud de onda en aguas profundas y H_b es la altura de ola en la rompiente.

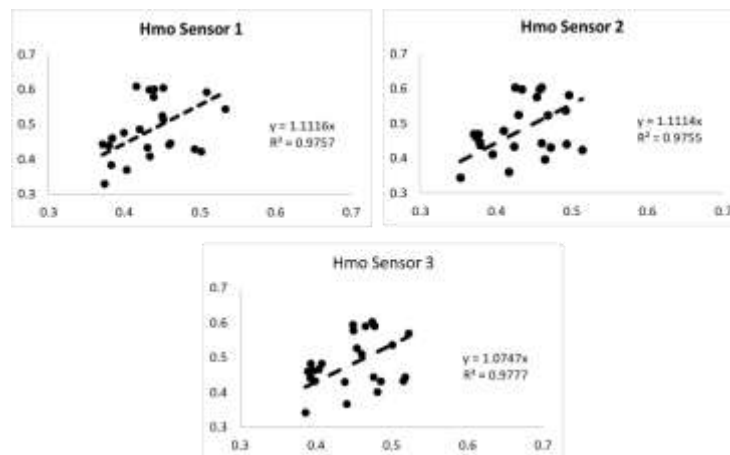
Para el reconocimiento del tipo morfodinámico más frecuente de la playa de Costa Verde, se implementó el parámetro adimensional de velocidad de caída del sedimento en playas micromareales (Wright & Short, 1984), puesto que es una función de las características de su sedimento, de las condiciones del oleaje y del estado previo de la playa, por ende, está dado por:

$$\Omega = \frac{H}{w \cdot T} \text{ (Ec. 5.3)}$$

Donde H es la altura media mensual de la ola antes de la medición en la playa, T es el período pico medio mensual antes de la medición en la playa y w es el valor medio de la velocidad de caída del grano del sedimento característico de la playa. Con estas variables que involucra el cálculo del parámetro se busca conocer cuáles son las formas deposicionales presentes y como es su interacción con la hidrodinámica actuante de la zona.

Una vez caracterizada las condiciones de la playa, se procede a modelar la hidrodinámica asociada al oleaje, con la implementación del modelo SWASH (Simulation Waves Till Shore) en las zonas de asomeramiento, de rompientes y ascenso-descenso del agua (zona swash). Este modelo es una herramienta numérica que simula los flujos de rotación, no hidrostáticos y de superficie libre, además tiene la capacidad de predecir las transformaciones de las ondas superficiales desde costa afuera hasta la playa, con énfasis en la zona de rompientes y de la zona swash. Por ello para este estudio se hace pertinente su implementación donde las ecuaciones que gobiernan son no lineales de aguas poco profundas incluyendo la presión no hidrostática (Zijlema, M et al, 2011). Se debe aclarar que previo a la aplicación del modelo se llevó a cabo un proceso de calibración del mismo a partir de los datos recolectados en la salida de campo de Febrero de 2015 (Ver Figura 3). La malla computacional empleada ha sido de un área de Costa Verde de 1600 metros de extensión longitudinal y 1200 metros de extensión transversal. Con una resolución espacial de tamaño de celda de 5 metros longitudinalmente y de 2 metros transversalmente

Figura 3: Coeficientes de correlación para H_{mo} .



La calibración realizada arrojó indicadores muy altos de coeficientes de correlación de Pearson, como se pueden observar en las siguientes gráficas, arrojando valores de R^2 por encima de 0.95. Así mismo, se obtuvo muy buenos índices de BIAS y RMS estando muy cercanos a cero (Ver Tabla 1).

Figura 4: Coeficientes de correlación para las velocidades orbitales U_{rms} y V_{rms} .

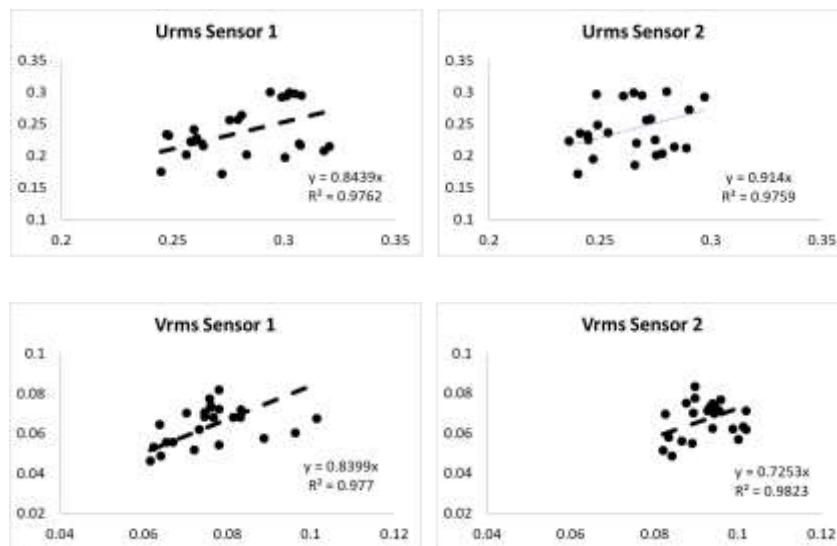


Tabla 1: Índices de BIAS y Rms para los tres parámetros evaluados

SUPERFICIE LIBRE		
	BIAS	Rms
S1	0.0502	0.0904
S2	0.0508	0.0907
S3	0.0358	0.0805

VELOCIDAD TRANSVERSAL		
	BIAS	Rms
S1	-0.0437	0.058
S2	-0.0223	0.0443

VELOCIDAD LONGITUDINAL		
	BIAS	Rms
S1	-0.0115	0.0157
S2	-0.0252	0.0269

Una vez obtenida la validación del modelo con parámetros estadísticos de confianza, se procedió a modelar las condiciones normales de la playa en 24 estados de mar, previamente seleccionados a partir del análisis de clima marítimo en la Boya 01. Con el fin de mostrar la comparación de las series de Hs, U y V en cada uno de los estados de mar modelados, se implementó el concepto de altura significativa espectral que es una aproximación a Hs y se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$m_0 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{\eta}(f) df \quad (\text{Ec. 5.4})$$

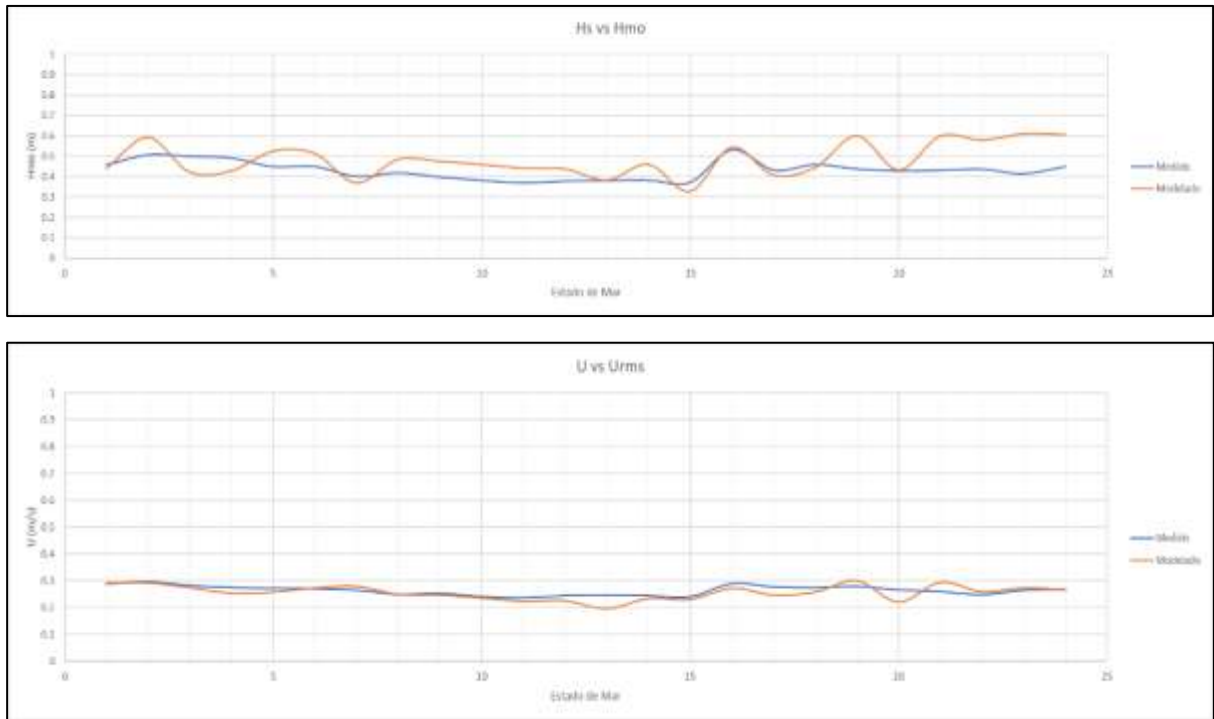
Donde, posteriormente se aplica $H_{mo} = 4 \times \sqrt{m_0}$ que tiende a $H_{mo} \approx H_s$. Para el cálculo de aproximación de la velocidad transversal y longitudinal se implementó la teoría de la Velocidad Orbital RMS que se calcula con:

$$U_{rms} = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_u(f) df} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$V_{rms} = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_v(f) df} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Con la aplicación de estas fórmulas se obtienen las aproximaciones de H_s , U y V , permitiendo comparar las series medidas con las modeladas. Obteniendo el siguiente comparativo:

Figura 5: Comparativo de datos medidos y datos modelados para H_s , U y V





Paralelamente se realizaron otras modelaciones de estados de mar donde se tuvo en cuenta variaciones en el periodo pico (8s y 12s) y la dirección de incidencia del oleaje en la costa (Direcciones de +15, -15 y 0). Estas modificaciones se ejecutan con el fin de analizar las condiciones en distintos escenarios de clima marítimo y verificar las diferentes condiciones hidrodinámicas presentes en la playa.

Con los resultados del modelo se procedió a realizar un procesamiento de señales para todos los estados de mar evaluados, en el que se desarrolló un análisis en el dominio de la frecuencia. Para un mejor reconocimiento de la evolución de la energía gravitatoria (G) e infragravitatoria (IG) a lo largo de un perfil de la playa, se tuvieron 6 puntos de control ubicados a 580 m (S1), 400 m (S2), 80 m (S3), 30 m (S4), 15 m (S5) y 6 m (S6) desde la línea de costa hacia aguas adentro. No obstante, para analizar la distribución de la energía G e IG en la playa fue necesario remover la tendencia y contribución de la marea para todos los campos de medición. Con los datos filtrados, se procedió aplicar técnicas de Fourier para la generación de espectros de densidad de energía para todos los estados de mar evaluados en cada uno de los puntos de control tanto para la superficie libre como para las velocidades longitudinales y transversales.



Con el fin de conocer los procesos de energía asociados a la llegada del oleaje en toda la costa se requiere de la aplicación de los métodos continuos de la transformada de wavelet (CWT) y los métodos discretos de la transformada de wavelet (DWT) (Conde et al., 2017; Massel, 2001) en los datos de las series de tiempo de elevación de la superficie libre y de las series de tiempo de velocidades longitudinales y transversales en cada uno de los estados de mar. Para la implementación de estas transformadas en la serie de datos fue necesario el uso de la herramienta de wavelet de MATLAB.

Finalmente, para obtener relaciones e interpretaciones acerca de las condiciones hidrodinámicas de la playa se utilizó los métodos de wavelet y se implementó la transformada cruzada (XWT) para determinar la relación que hay entre la elevación de la superficie libre y las velocidades longitudinales y transversales y el análisis de coherencia (WTC) para encontrar el nivel de significancia de esa relación entre las series analizadas. Es posible lograr estas relaciones porque se está analizando la energía que hay en común entre las series, así como también la fase entre las variables (Grinsted et al., 2004; (Torrence, & Compo, 1998). Además, como propone (Winter et al, 2017) será posible evaluar y clasificar el tipo de onda infragravitatoria actuante en la playa, ya que al analizar la relación de fase entre la superficie libre y las velocidades longitudinales y transversales, se encontrará un *Lag* por cada emparejamiento ((η -u), (η -v) y (u-v)), que al agruparlos según la

metodología planteada por (Winter et al, 2017) permite distinguir el tipo de IG y como está incide en la costa.

6. Resultados

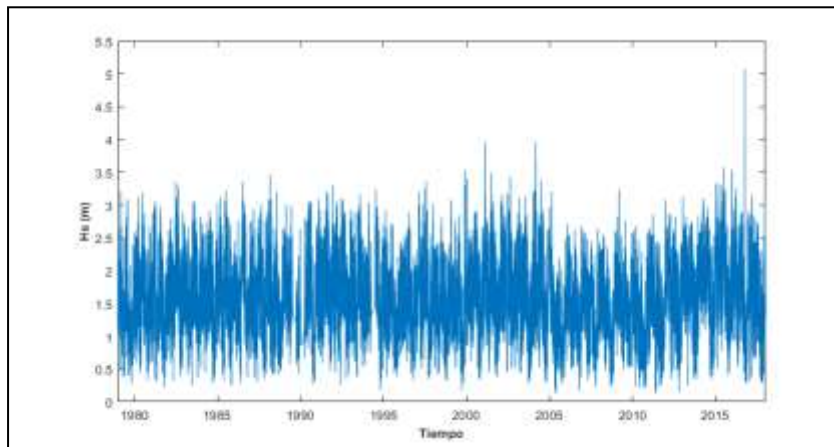
Con la implementación de un análisis de régimen medio (clima marítimo) y régimen extremal (método de máximos anuales), el procesamiento de las series de oleaje a nivel de aguas profundas como de aguas someras, arrojaron los siguientes indicadores:

6.1 Clima Marítimo

6.1.1 Aguas profundas

En la zona de aguas profundas, las condiciones medias que se pueden obtener del registro histórico que data entre los años 1979 y 2018, se tiene que la serie de tiempo de altura de ola presenta el comportamiento de la Figura 6.

Figura 6: Serie de tiempo de 1979 a 2018 de la zona de aguas profundas



Se puede observar del comportamiento de la serie de tiempo que la altura significativa de la ola (H_s) osciló entre 0.3 m hasta 5 m y el periodo pico (T_s) tiene un rango entre 2 s y 20 s. En cuanto a la rosa de oleaje y los estadísticos básicos de H_s , se obtuvo que la dirección predominante de donde proviene el oleaje es ENE, con una probabilidad de ocurrencia del 73% y están asociadas en

promedio a alturas de ola de 1.50 m, aunque también hay una incidencia importante que viene de NE con una ocurrencia del 24% y con alturas de ola de 1.48 m (Ver Tabla 2).

Figura 7: Rosa de oleaje de la zona de aguas profundas

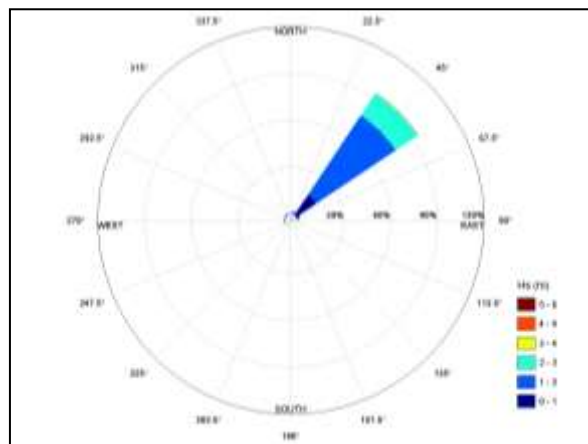
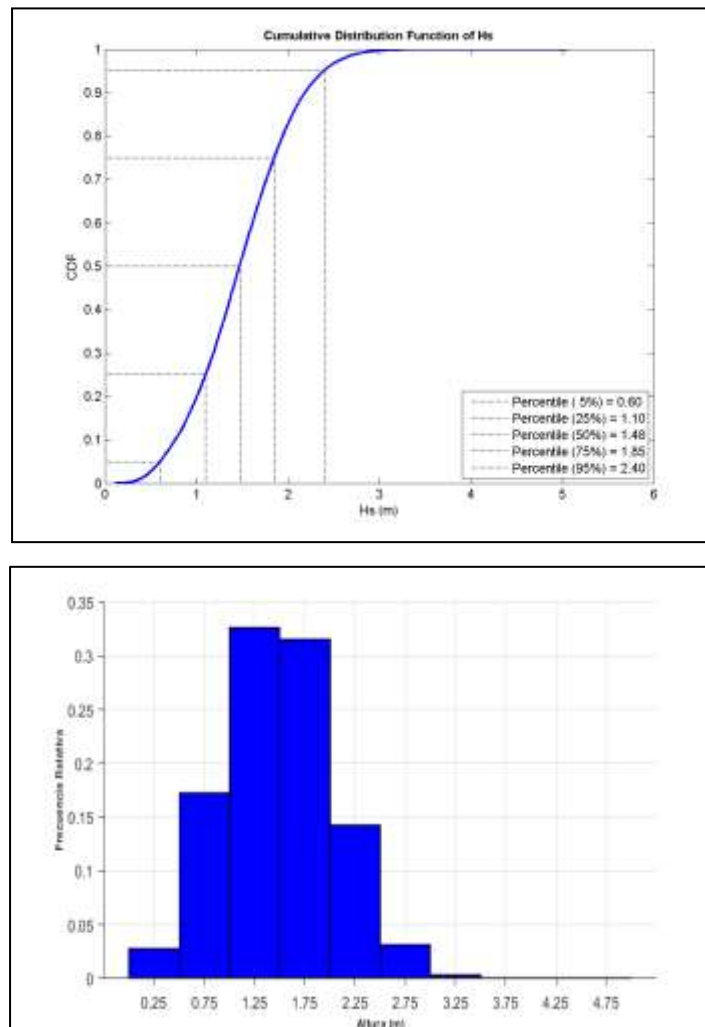


Tabla 2: Estadísticos básicos de Hs en zona de aguas profundas

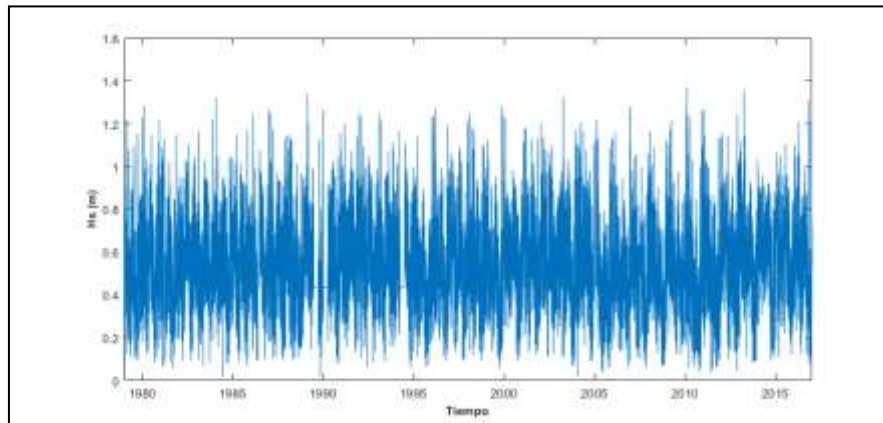
Dirección	Prob Dirección	Hs (m) 25%	Hs (m) 50%	Hs (m) 75%	Hs (m) 90%	Hs (m) 95%	Hs (m) Máx
N	0.004	0.600	0.840	0.840	1.420	2.334	2.500
NNE	0.005	0.570	0.825	1.100	1.620	2.780	3.770
NE	0.24	1.110	1.480	1.860	2.210	2.846	5.070
ENE	0.73	1.130	1.500	1.870	2.200	2.760	3.960
E	0.001	0.595	0.675	0.730	0.806	0.970	0.970
ESE	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	0
SSW	0	0	0	0	0	0	0
SW	0	0	0	0	0	0	0
WSW	0.001	0.530	0.695	0.890	0.909	0.990	0.990
W	0.002	0.510	0.690	0.856	1.080	1.449	1.630
WNW	0.003	0.490	0.720	0.947	1.202	1.634	2.440
NW	0.004	0.660	0.934	1.370	1.710	2.480	3.310
NNW	0.008	0.620	0.910	1.210	1.470	1.931	2.270

Las alturas significantes de ola predominante en las zonas de aguas profundas de esta playa son entre 1.25 m y 1.75 m, como se puede observar en la Figura 9, que representa la distribución acumulada de probabilidad de Hs. Y esto último se valida con el comportamiento del histograma de Hs (Figura 7), donde se logra evidenciar el mismo comportamiento típico de alturas entre 1 m y 2 m.

Figura 8: Distribución de probabilidad acumulada e histograma de Hs en aguas profundas

6.1.2 Aguas someras

Para el caso de aguas someras, se tiene un registro histórico que va de 1979 a 2017 y desarrolló el comportamiento que se evidencia en la Figura 9.

Figura 9: Serie de tiempo de 1979 a 2017 de la zona de aguas someras

Esta serie de tiempo muestra que la altura significativa de la ola osciló entre 0.05 m hasta 1.37 m y el periodo nuevamente tiene un rango que va entre 2 s y 20 s. En el caso de la rosa de oleaje se puede detallar que la dirección predominante de dónde vienen las olas es NNW, con una probabilidad de ocurrencia de 97.2% y está asociado en la mayoría de los casos a alturas de ola de 0.50 m (Ver Tabla 3).

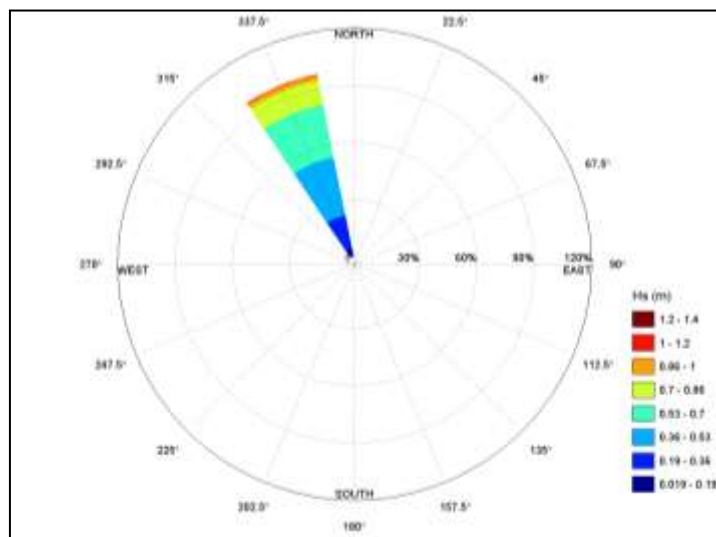
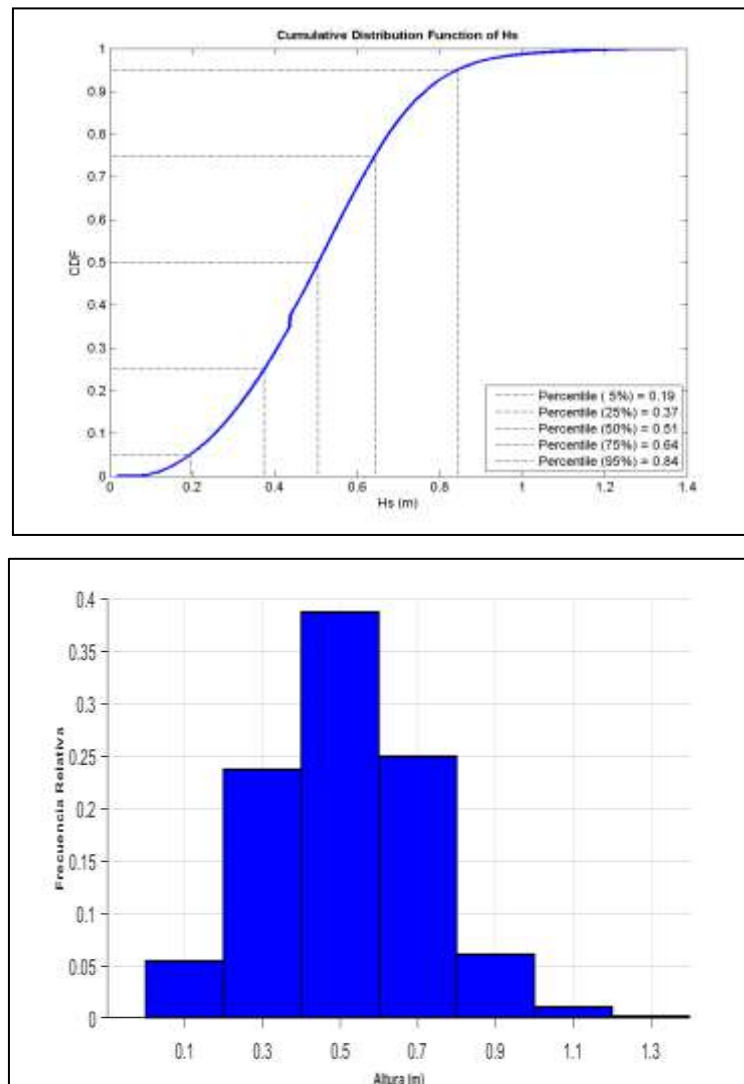
Figura 10: Rosa de oleaje de la zona de aguas someras

Tabla 3: Estadísticos básicos de Hs en zona de aguas someras

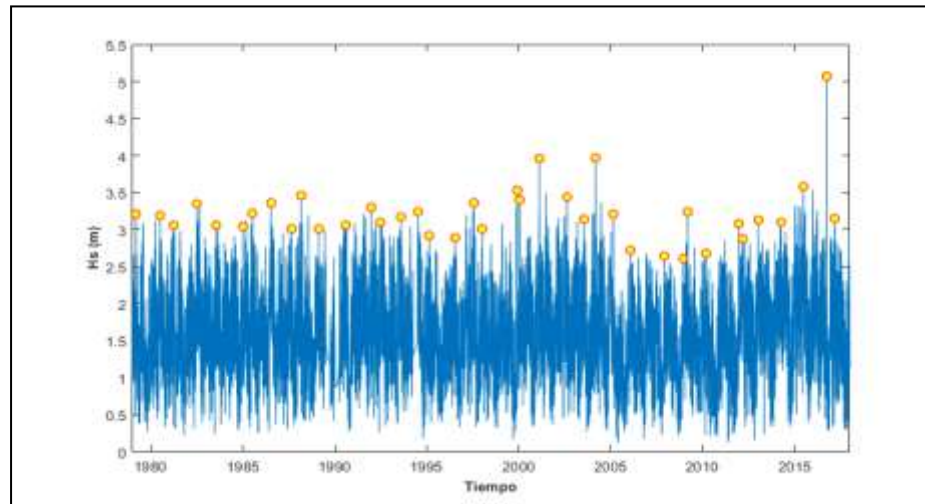
Dirección	Prob. Dirección	Hs (m) 25%	Hs (m) 50%	Hs (m) 75%	Hs (m) 90%	Hs (m) 99%	Hs (m) máx
N	0.01	0,1290	0,176	0,176	0,240	0,266	0,292
NNE	0	0	0	0	0	0	0
NE	0	0	0	0	0	0	0
ENE	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0
ESE	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	0
SSW	0	0	0	0	0	0	0
SW	0	0	0	0	0	0	0
WSW	0	0	0	0	0	0	0
W	0	0	0	0	0	0	0
WNW	0.001	0,248	0,342	0,401	0,470	0,560	0,581
NW	0.007	0,345	0,556	0,883	1,135	1,275	1,355
NNW	0.972	0,380	0,508	0,644	0,764	1,023	1,372

Las alturas significantes de ola predominante en las zonas de aguas someras de esta playa son entre 0.4 m y 0.6 m, como se puede observar en la Figura 11, que representa la distribución acumulada de probabilidad de Hs en cercanías a la costa. No obstante, hay un porcentaje considerable de ocurrencia para olas que tienen alturas entre 0.2 y 0.4 m y lo mismo ocurre para olas con alturas entre 0.6 y 0.8 m.

Figura 11: Distribución de probabilidad acumulada e histograma de Hs en aguas someras

6.1.3 Régimen Extremal

Con el uso de un método de máximos anuales, se obtuvo que las condiciones extremas en esta zona presentan el siguiente comportamiento de los valores extremos, que se puede observar en la Figura 12.

Figura 12: Registro histórico de máximos anuales de Hs desde 1979 a 2018

Se obtuvo que entre los años muestreados por la serie de tiempo entre 1979 y 2018, se encontraron 40 máximos anuales, los cuales evidenciaron alturas de ola que van de los 2.61 m a los 5.07 m. No obstante, en la Tabla 4 se pueden detallar con mayor claridad cada uno de los máximos por año muestreado.

Tabla 4: Valores máximos de Hs por año

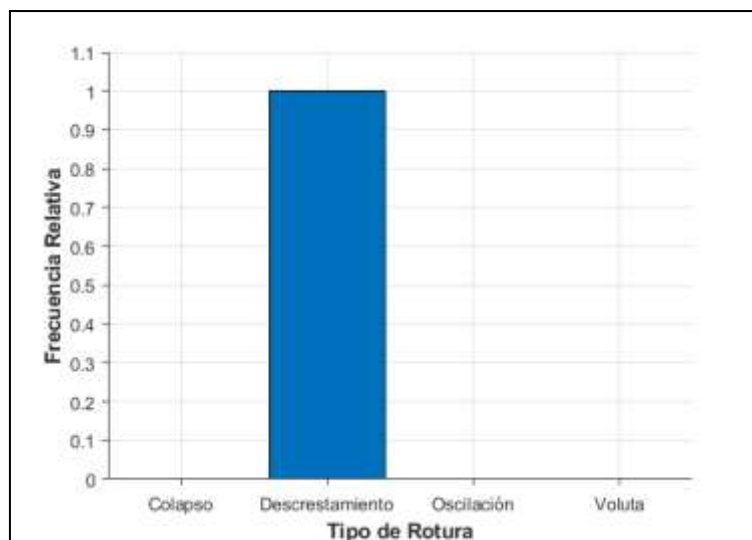
Máximos Anuales Hs							
Año	Altura (m)	Año	Altura (m)	Año	Altura (m)	Año	Altura (m)
1979	3.210	1990	3.060	2001	3.960	2012	2.880
1980	3.190	1991	3.300	2002	3.440	2013	3.130
1981	3.060	1992	3.100	2003	3.140	2014	3.100
1982	3.350	1993	3.170	2004	3.970	2015	3.580
1983	3.060	1994	3.240	2005	3.210	2016	5.070
1984	3.040	1995	2.920	2006	2.720	2017	3.150
1985	3.220	1996	2.890	2007	2.640	2018	3.362
1986	3.360	1997	3.360	2008	2.610		
1987	3.010	1998	3.010	2009	3.240		
1988	3.460	1999	3.530	2010	2.680		
1989	3.010	2000	3.400	2011	3.080		

6.2 Tipo de Rotura y Estado Morfodinámico Modal

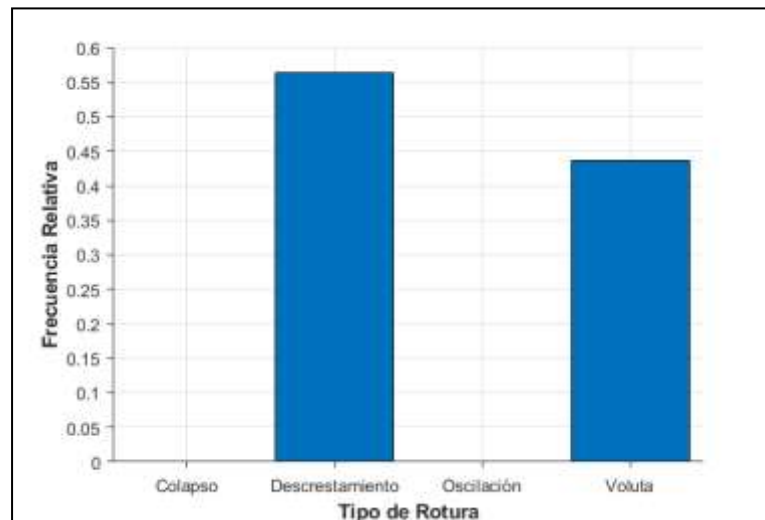
El cálculo del número de Iribarren para conocer el tipo de rotura de Costa Verde se dividió en dos: Un cálculo para la obtención de la rotura en aguas profundas y otro cálculo para el resultado en aguas someras.

Para el caso de aguas profundas, el resultado que arrojó el cálculo de este parámetro es el mostrado en la Figura 13, donde se puede observar que durante todo el tiempo la rotura es de tipo descrestamiento.

Figura 13: Histograma de tipo de rotura del oleaje en aguas profundas.



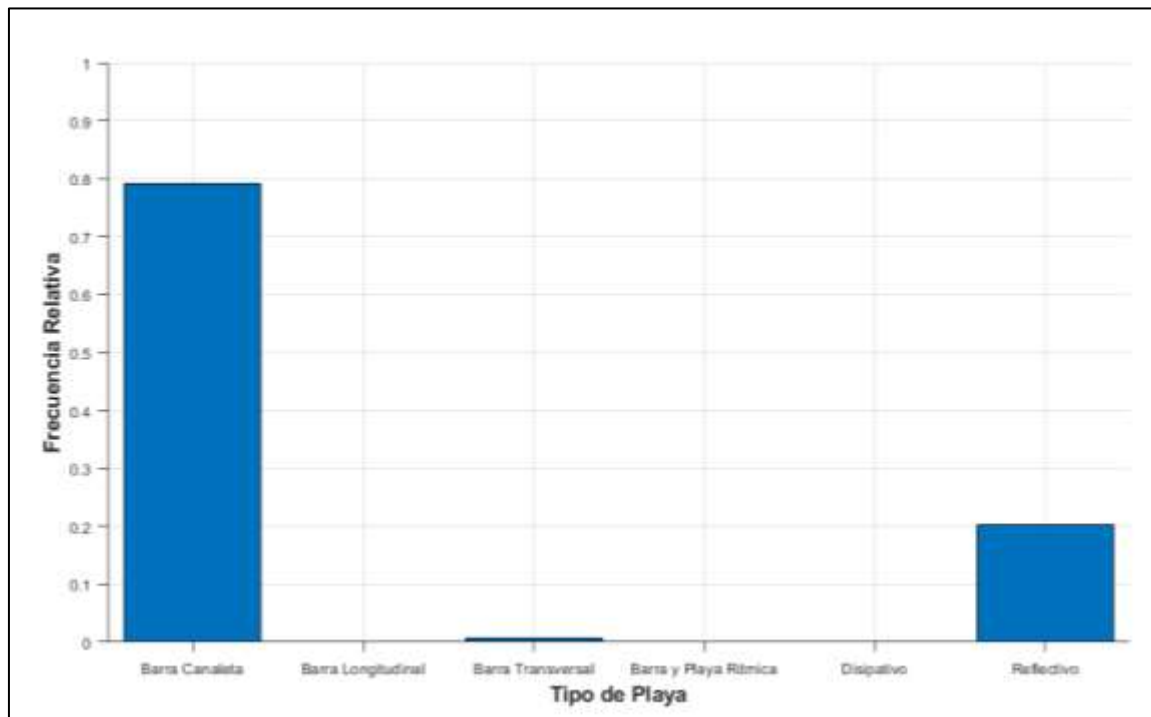
Para el caso de aguas someras se encontró que los cálculos arrojaron el resultado que se evidencia en la Figura 14, donde se observa que en un poco más de la mitad de las veces del tiempo, la rotura es de tipo descrestamiento, no obstante, durante otros periodos, un poco inferior a la mitad de las veces también puede ser común que se presente un tipo de rotura en voluta.

Figura 14: Histograma de tipo de rotura del oleaje en aguas someras.

De manera general, los resultados muestran que es común que en esta playa se encuentren roturas de tipo descrestamiento y voluta, lo que indicaría que se forman olas con una cresta aguda y su cara frontal sea casi que vertical. Este rompimiento produce una gran turbulencia que paulatinamente genera cambios alrededor de toda la costa.

Para la obtención del estado morfodinámico de la playa, se obtuvo que el parámetro omega arrojó resultados entre tres tipos de playas: Barra Transversal, Barra Canaleta y Reflectiva. No obstante, la Figura 15 ilustra que la mayoría de los parámetros obtenidos (alrededor del 80%) acogen un tipo de playa intermedia reflejante de tipo Barra Canaleta, según la clasificación de (Wright & Short, 1984). De este tipo de estado, se espera que en las terrazas donde la pendiente es muy baja, se dé un comportamiento disipativo, mientras que en el talud su comportamiento sea totalmente reflejante. Además, se espera que, con la presencia de Barra-Canaleta se desarrolle en su morfología corrientes de retorno (rip currents), donde las canaletas serían la salida de ese flujo de retorno.

Figura 15: Histograma del tipo de estado morfodinámico de la playa.

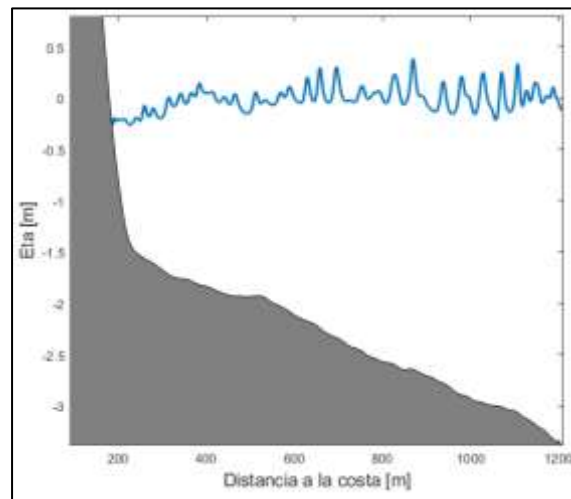


6.3 Resultados Modelo SWASH

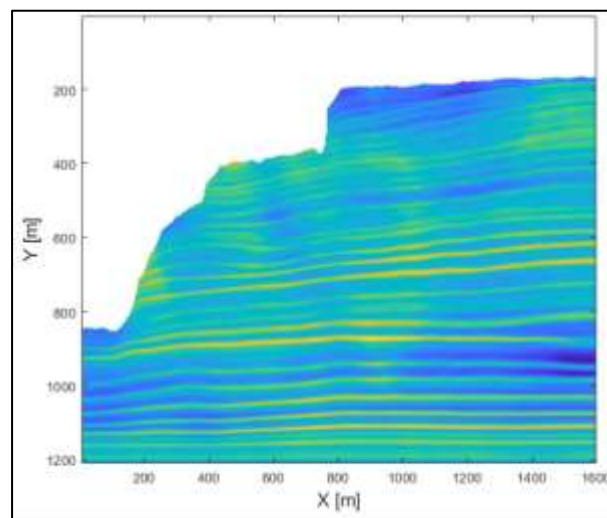
Con la implementación del modelo SWASH para la playa de Costa Verde, se obtuvieron resultados en los que se destacan series de tiempo de la evolución de la superficie libre, velocidades transversales y longitudinales, entre otros.

6.3.1 Evolución de la superficie libre

Los resultados del modelo para la evolución de la superficie libre arrojaron el siguiente comportamiento desde costa afuera hacia aguas someras que se puede observar en la Figura 16, para uno de los tramos obtenidos de toda el área de costa modelada.

Figura 16: Evolución de la superficie libre desde costa afuera hacia aguas someras

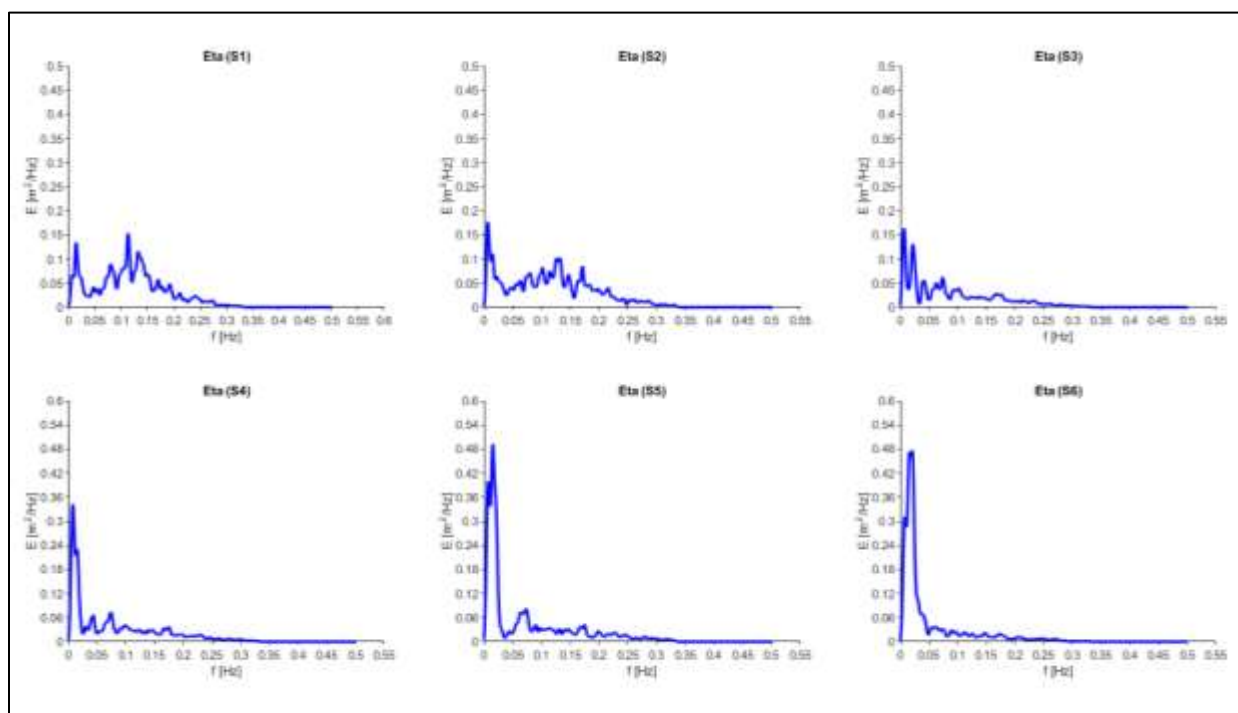
En el que se puede observar que a medida que se acerca a la costa, la diferencia de la superficie libre se hace cada vez más pequeña e indirectamente se puede ver el fenómeno de reducción de la longitud de onda del oleaje debido al proceso de asomeramiento que va ocurriendo. Sumado a esto, se observa claramente en el perfil, las dos pendientes con que cuenta este tipo de playa, mostrando que modela muy bien las condiciones reales de la zona. Por otro lado, en la Figura 17 se puede ver cómo llega el oleaje a la costa en sentido Sur-Norte, donde dicha situación se evidenciará en la rotura de algunos puntos de control.

Figura 17: Entrada del oleaje a las playas de Costa Verde

6.3.2 Análisis espectral de la superficie libre y las velocidades transversales y longitudinales.

Con las técnicas de Fourier se obtuvieron una serie de espectros de densidad de energía tanto para las condiciones normales como para aquellas donde se modificó el periodo pico o la dirección de incidencia del oleaje en la costa. Para los estados de mar que representan las condiciones de régimen medio, la Figura 18 muestra de manera general como se da la evolución de las señales para la superficie libre en cada uno de los puntos de control.

Figura 18: Espectro de la superficie libre para las condiciones normales en Costa Verde

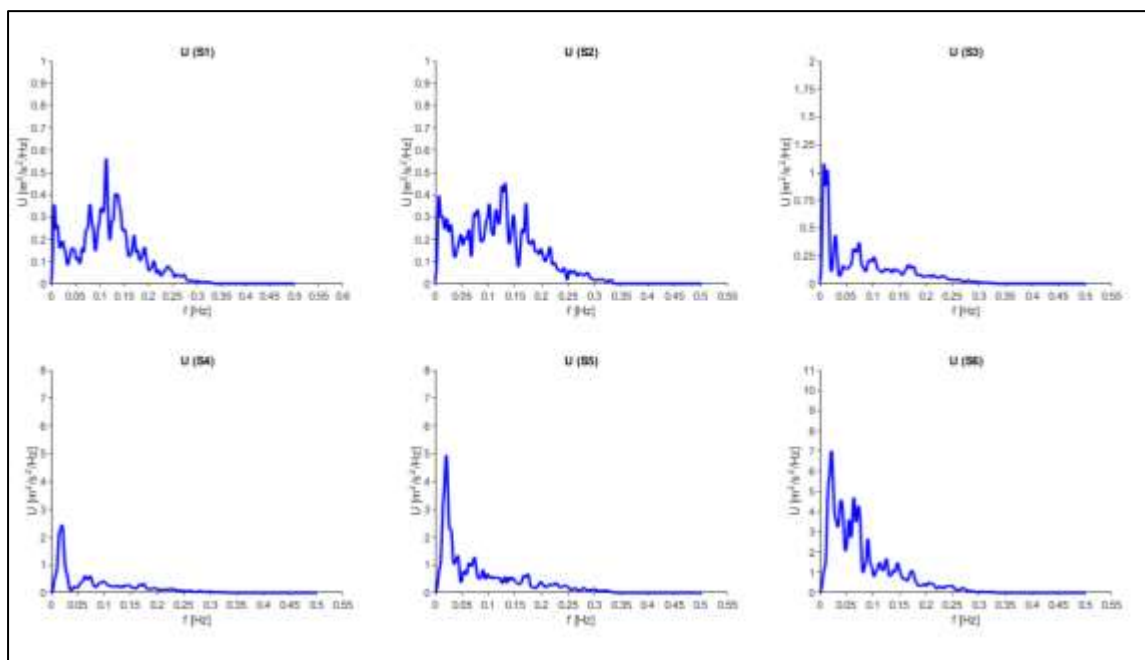


Se observa que en S1 el registro marca un pico de energía entre los periodos de 12 s a 8 s para la banda gravitatoria, no obstante, se logra observar otro pico de energía considerable para la banda infragravitatoria con un periodo entre los 100 s y 200 s. Al ser un punto muy lejano de la costa, se podría inferir que ese pico es producto de ondas reflejadas desde la costa. Para S2 nuevamente se evidencia picos con el mismo nivel de energía para la banda gravitatoria en los periodos correspondientes de 10 s a 6 s pero esta vez para la banda infragravitatoria se obtiene un nivel de energía un poco más elevado, dado una mayor cercanía a la costa y mayor incidencia de las ondas reflejadas desde la playa. Para S3, S4, S5 y S6 los espectros muestran que hay un dominio absoluto de la banda infragravitatoria en estas zonas de la playa, siendo consistente por estar muy cerca a la costa y ya en estas zonas el oleaje que viene viajando en grupo se ha separado por completo y la

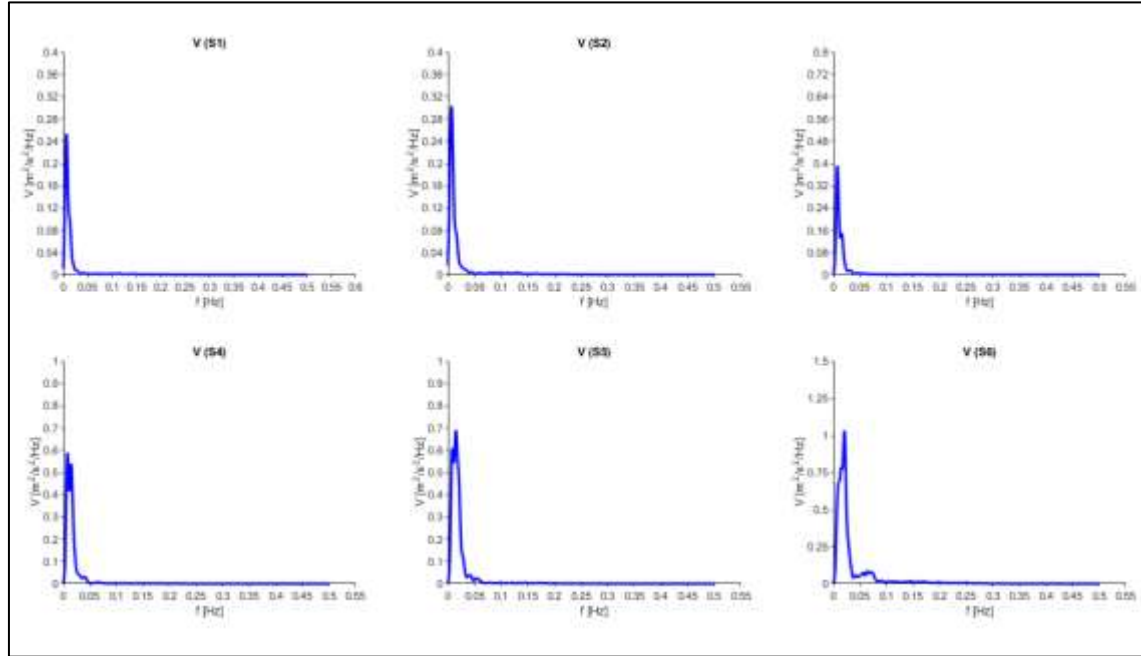
banda infragravitatoria empieza a dominar los procesos costeros sumado al hecho que la reflexión del oleaje en la costa ayuda a incrementar los niveles de energía para estas frecuencias.

Para los espectros de densidad de energía en condiciones normales de la velocidad transversal (u) se puede observar la Figura 19, y para el caso de la velocidad longitudinal (v) se tiene la Figura 20.

Figura 19: Espectro de velocidad transversal para condiciones normales en Costa Verde



Los espectros de energía muestran que las magnitudes de la velocidad transversal son más elevadas que el de la velocidad longitudinal, en cualquiera de los puntos de control que se evalúe. Además, al analizar puntualmente cada uno se puede ver que los espectros de u en el caso de S1 y S2 muestra dos picos, un primer pico para periodos entre 10 s y 5 s asociados a la banda gravitatoria, pero hay otro pico asociado a la banda infragravitatoria con periodos superiores a los 100 s. Para el caso de los puntos de control restantes como es S3, S4, S5 y S6 se manifiesta el mismo comportamiento que en la superficie libre, es decir, al parecer existe un dominio absoluto en estas zonas de la playa de las bajas frecuencias. Para el caso de los espectros de v muestran que la energía en cualquier punto de control es dominada por la banda infragravitatoria. Este comportamiento de u y v permiten dar por sentado que en las zonas muy cercanas a la costa efectivamente el oleaje IG tiene la mayor incidencia en los procesos costeros de esta playa.

Figura 20: Espectro de velocidad longitudinal para condiciones normales en Costa Verde

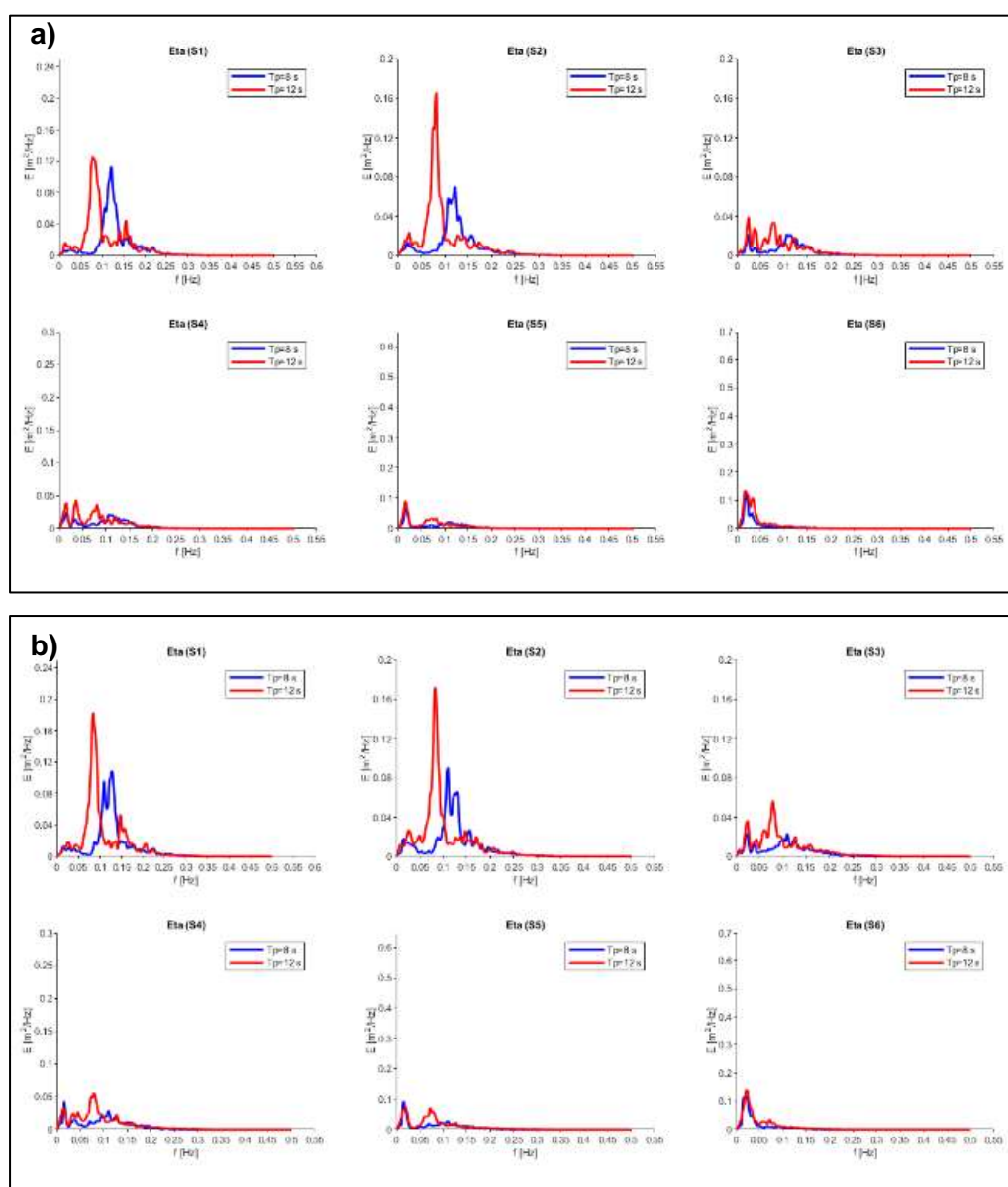
Una vez comprendido los resultados de las condiciones normales, es pertinente evidenciar si la dirección del oleaje incidente cambia o si el periodo pico con que llega el oleaje varía. (Nota: No se hará énfasis en cómo cambian los resultados si el H_s varía porque se considera una situación muy trivial donde lo que se esperara es que simplemente los niveles de energía aumenten, en la medida que se incrementa la altura significativa). Para estas situaciones modeladas donde se modifican algunos parámetros se tienen las Figuras 21 a, 21 b y 21 c que muestran los espectros de la superficie libre que representan los casos de H_s de 0.5 m y direcciones de incidencia de -15° , 0° y $+15^\circ$ respectivamente, variando el periodo pico de 8 s (línea azul) y 12 s (línea roja). Mientras que las Figuras 21 d, 21 e y 21 f detallan nuevamente la variación del periodo pico de 8 s y 12 s para los casos de H_s de 1.5 m y direcciones de $+15^\circ$, 0° y -15° en ese mismo orden.

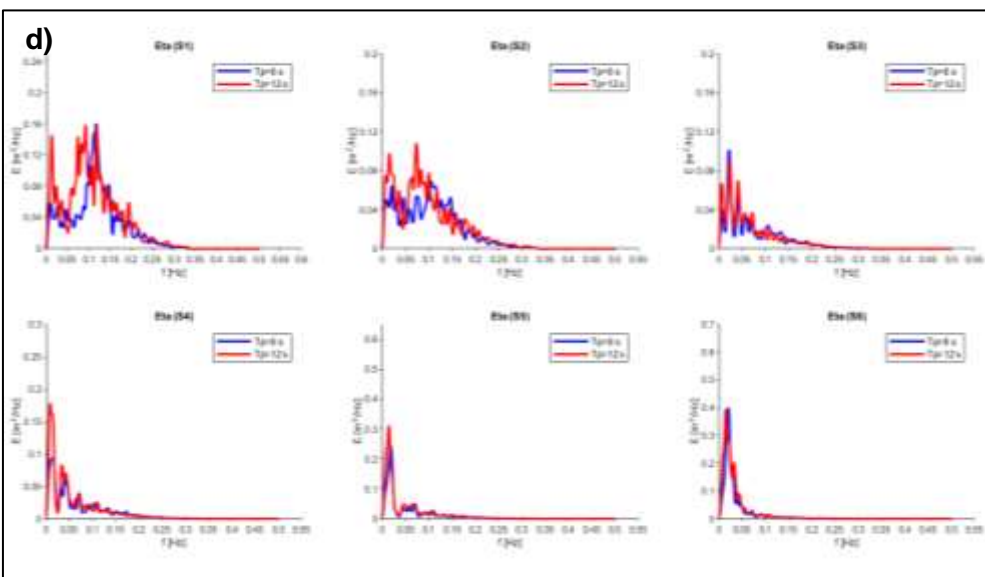
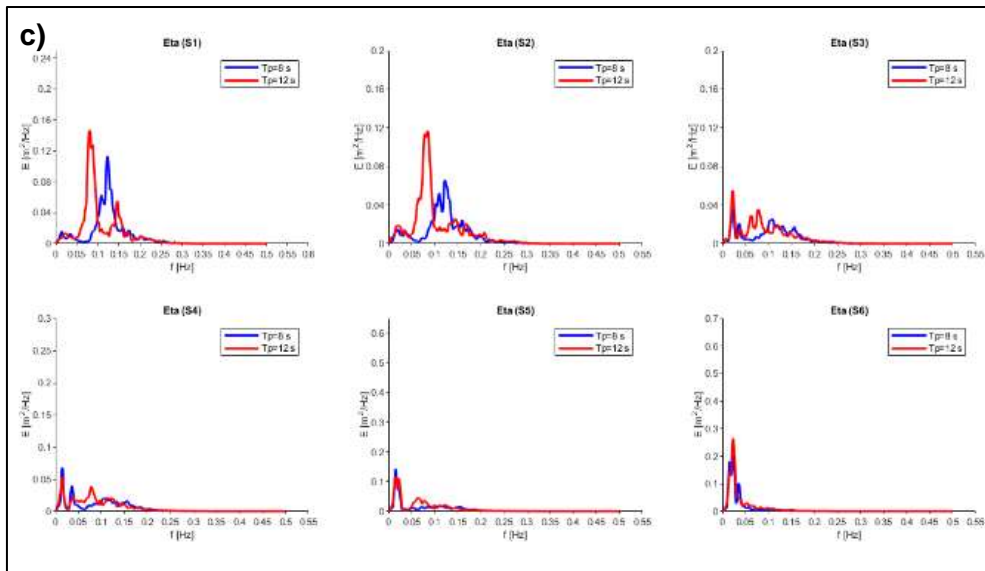
Observando los espectros de η con más detalle se destaca que, en los tres primeros hay una diferencia marcada en el pico de los puntos de control de S1 y S2, donde se observa claramente un dominio de la banda gravitatoria y no se evidencia rastros de algún tipo de influencia de IG, sin embargo a medida que nos vamos acercando a la costa, los puntos restantes (S3, S4, S5 y S6) ilustran la aparición muy marcada de la banda infragravitatoria e incluso llega a desaparecer la diferencia de los picos entre los periodos y la banda G también pierde su influencia. En los tres casos restantes, por el contrario, en los dos primeros puntos (S1 y S2) arroja influencia de ambas bandas, siendo un poco más elevada para el caso de la banda gravitatoria, además que no hay desfase en los picos de

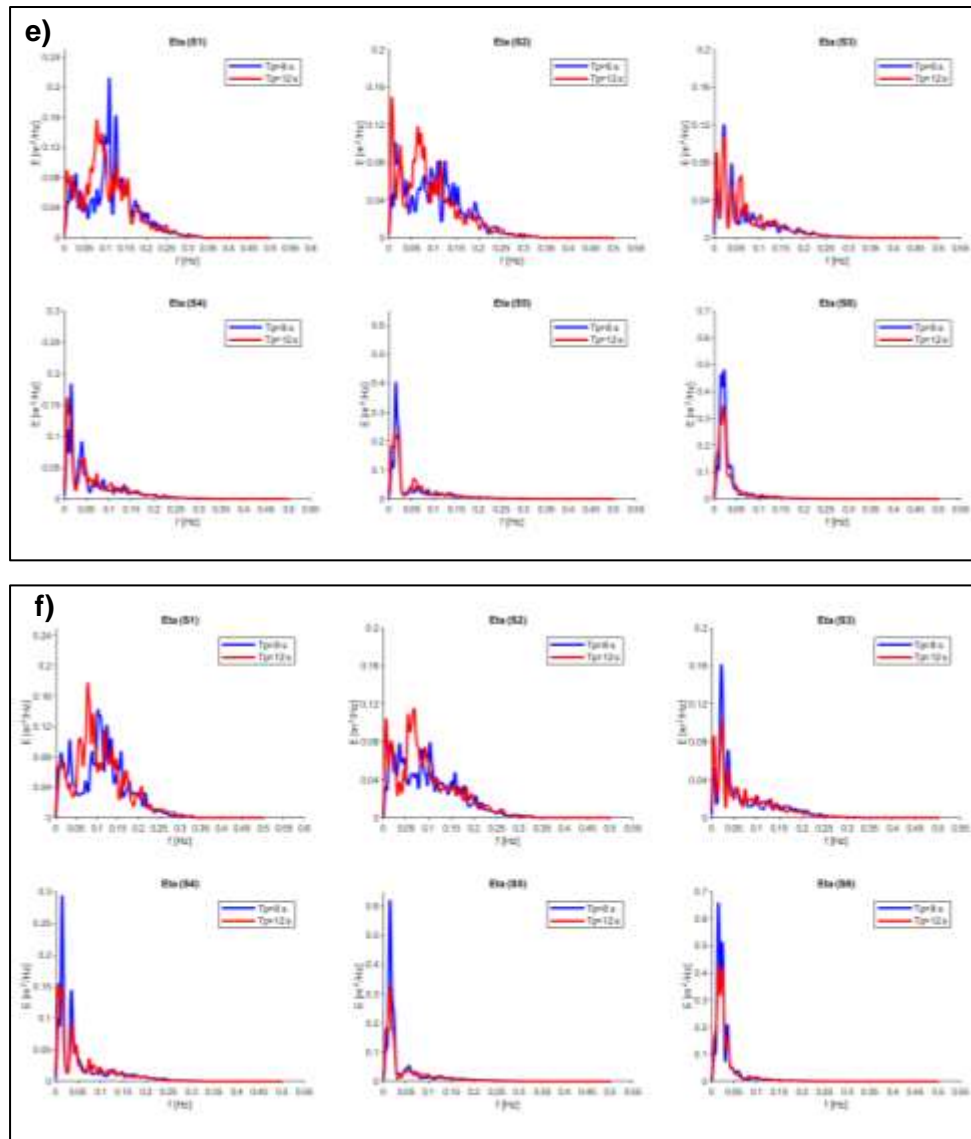
los demás espectros. También se puede mencionar que, en los puntos de control restante, la banda infragravitatoria sigue siendo la dominante en cercanías a la costa y presenta una particularidad que en los puntos S4, S5 y S6, la energía llega a ser mayor para el periodo de 8s que para el de 12s.

Para estos mismos escenarios anteriormente expuestos, pero en las velocidades transversales y longitudinales se presenta la Figura 22 y 23 en las que se puede decir que para el caso de la Figura 22, los puntos S1 y S2 tienen un comportamiento similar en todos los casos al que se evidencia en las Figuras 19.

Figura 21: Comparación de espectros de energía de la superficie libre variando T_p vs Dirección y H_s .

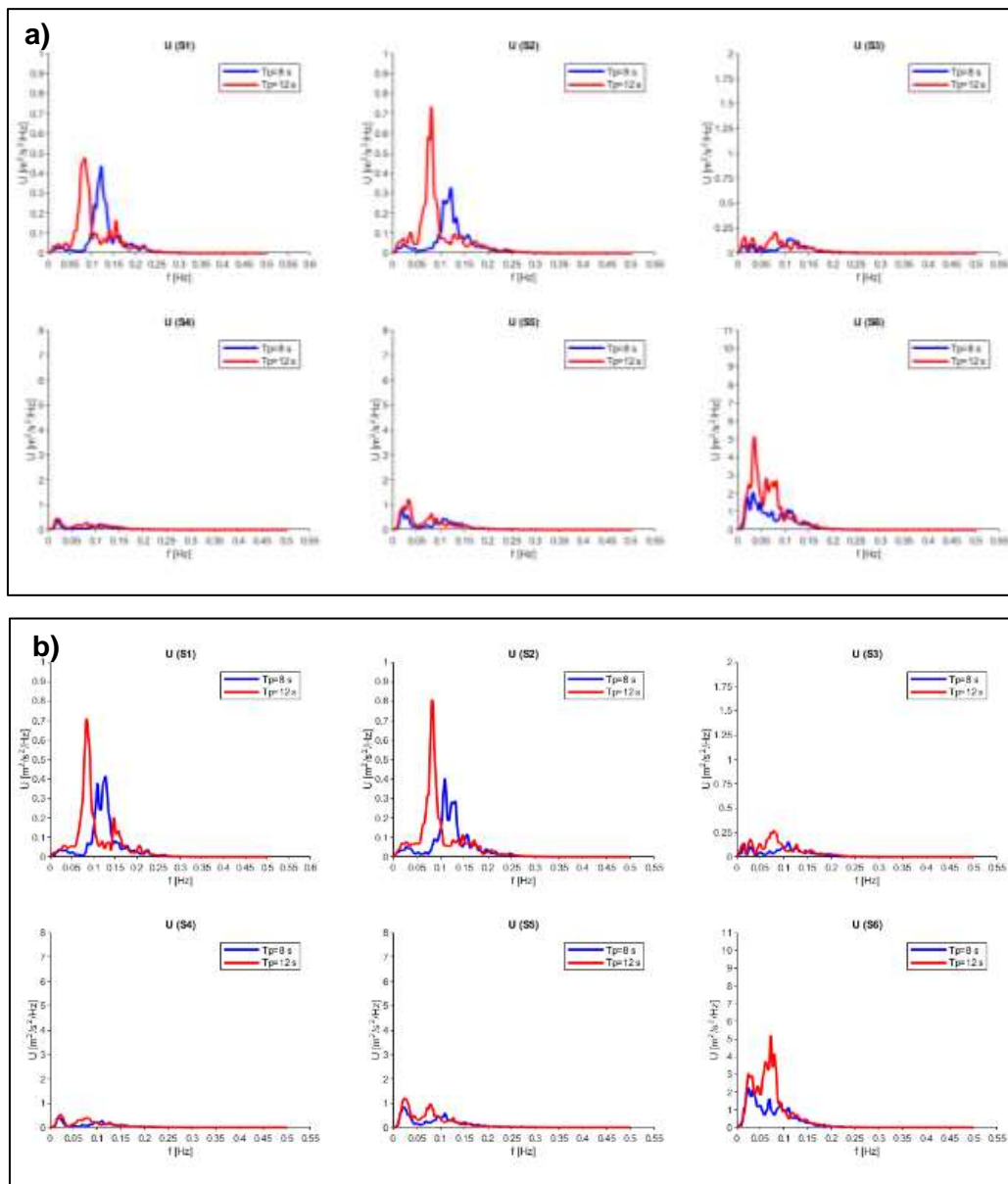


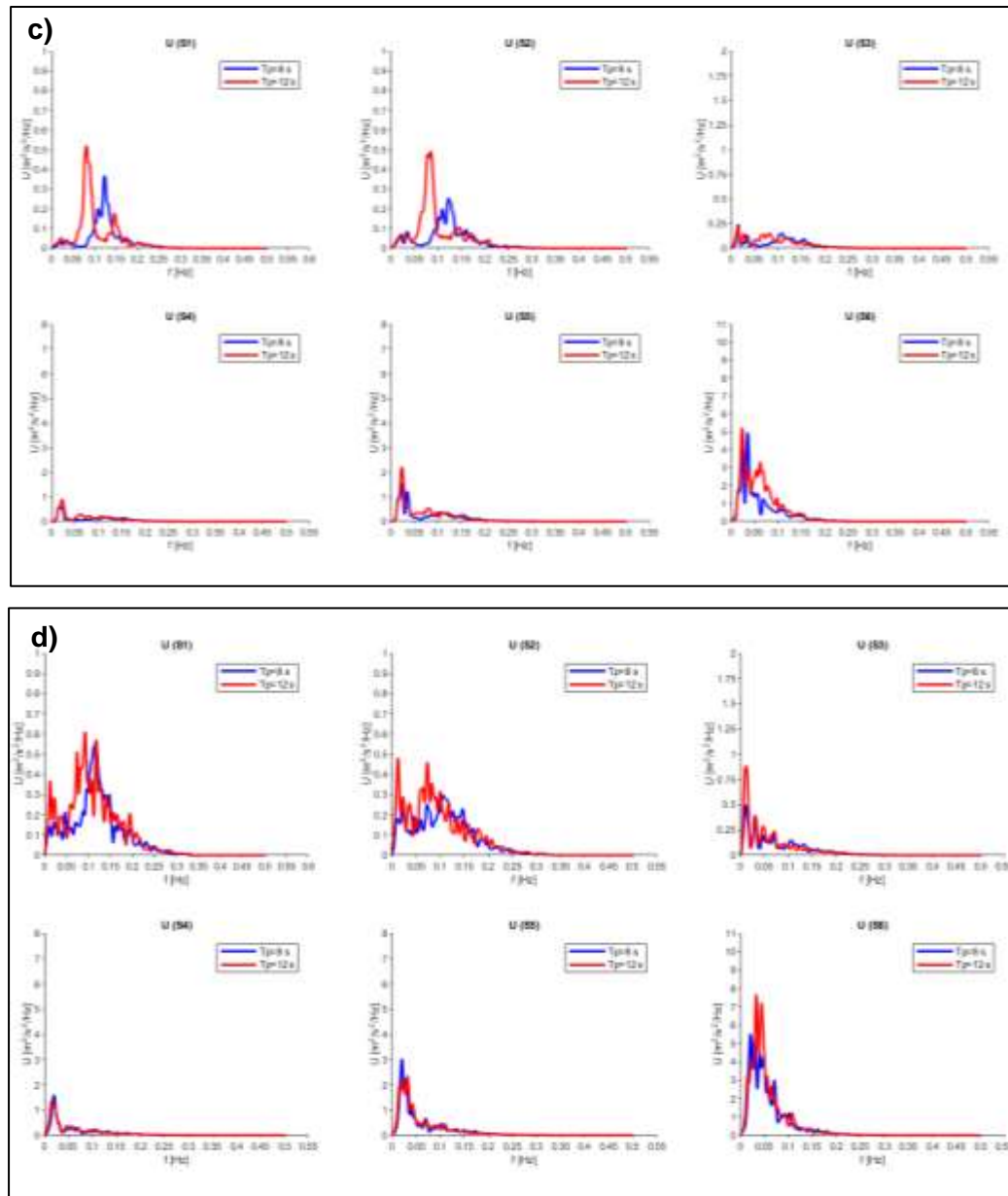


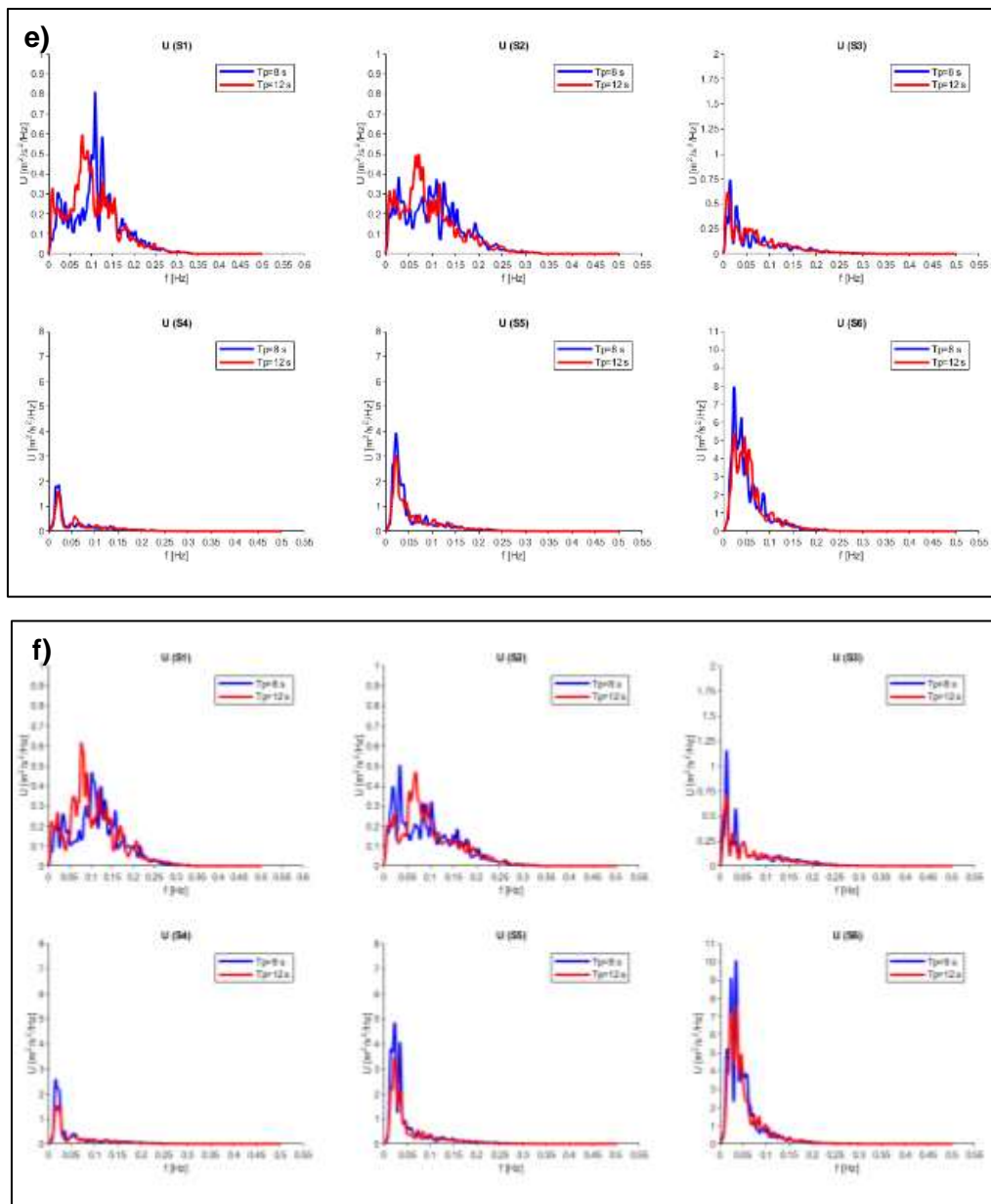


Para los puntos S3, S4 y S5 también se mantiene el mismo comportamiento, evidenciando una evolución de los espectros donde desaparece cualquier influencia marcada de la banda G y empieza a verse un dominio completo de la banda infragravitatoria. No obstante, para el caso de S6 si se ven diferencias con respecto a lo que muestra la superficie libre y es que se observa un aumento repentino en los picos de todas las figuras. Al estar muy cercanos a la costa, la reflexión del oleaje y la presencia de algún tipo de onda infragravitatoria incrementa los indicadores de la banda IG para esa zona de la playa.

Figura 22: Comparación de espectros de energía de la velocidad transversal variando T_p vs Dirección y H_s .

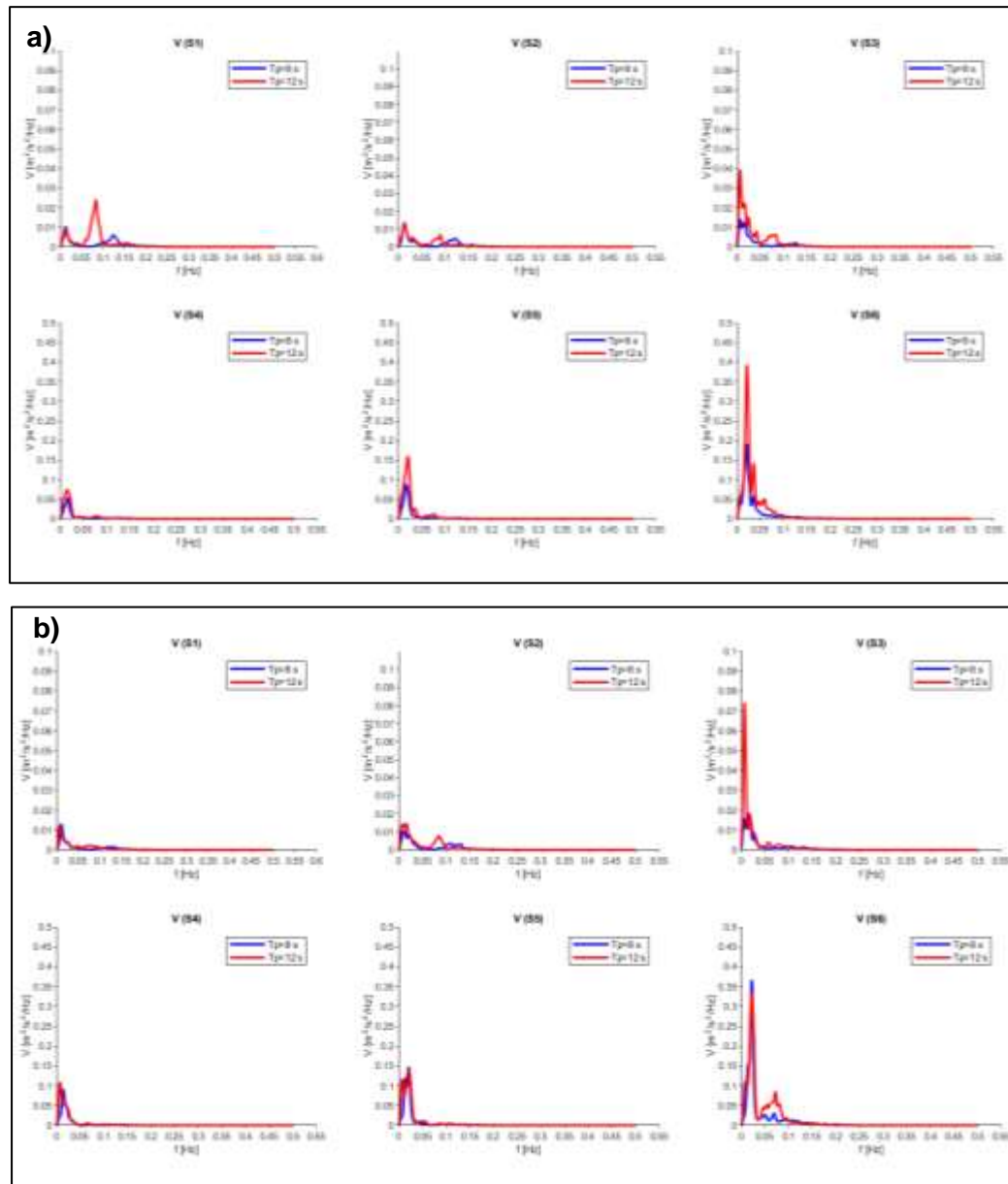


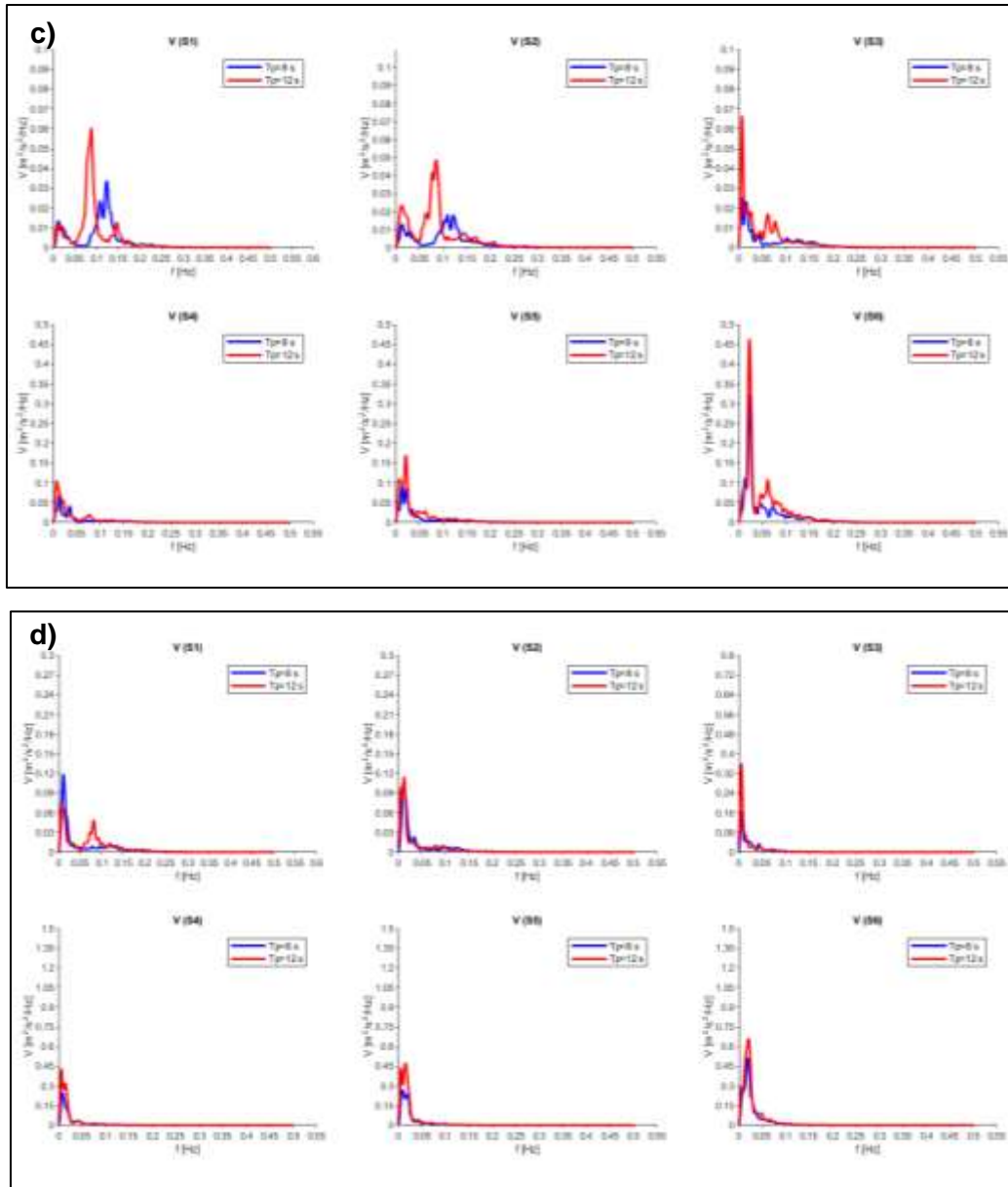


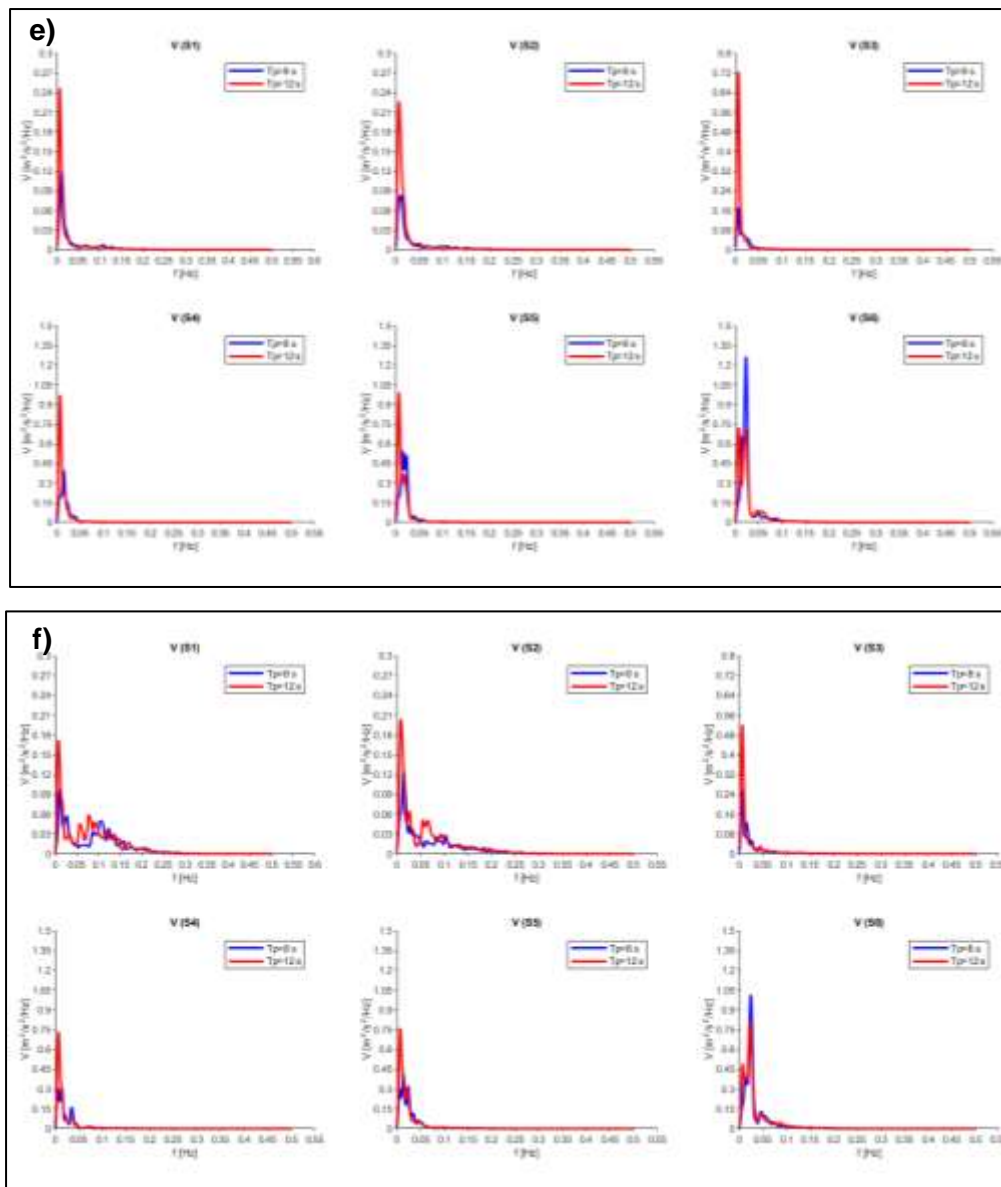


Para las Figuras 23, en estos mismos escenarios que se viene detallando, los espectros de v muestran un comportamiento distinto a lo anteriormente observado, en ningún registro se logra evidenciar un desfase marcado entre los picos de energía, en S1 y S2 no se ve tan marcado la influencia de la banda G en lejanías de la costa y por el contrario la mayoría de los espectros muestran un gran influencia de la banda infragravitatoria inclusive en aquellos puntos de control no tan cercanos a la costa como es el caso de S1 y S2.

Figura 23: Comparación de espectros de energía de la velocidad longitudinal variando T_p vs Dirección y H_s .



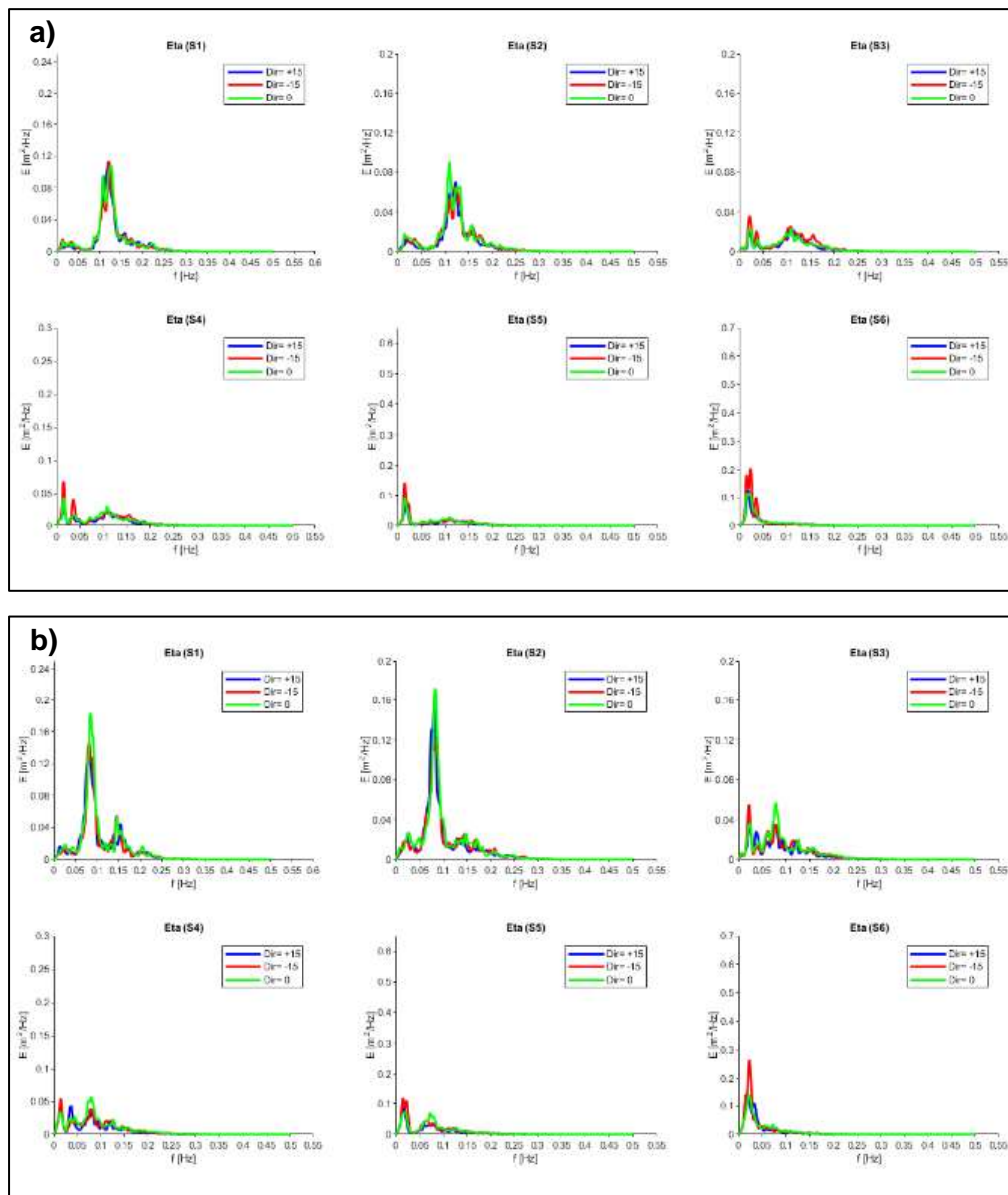


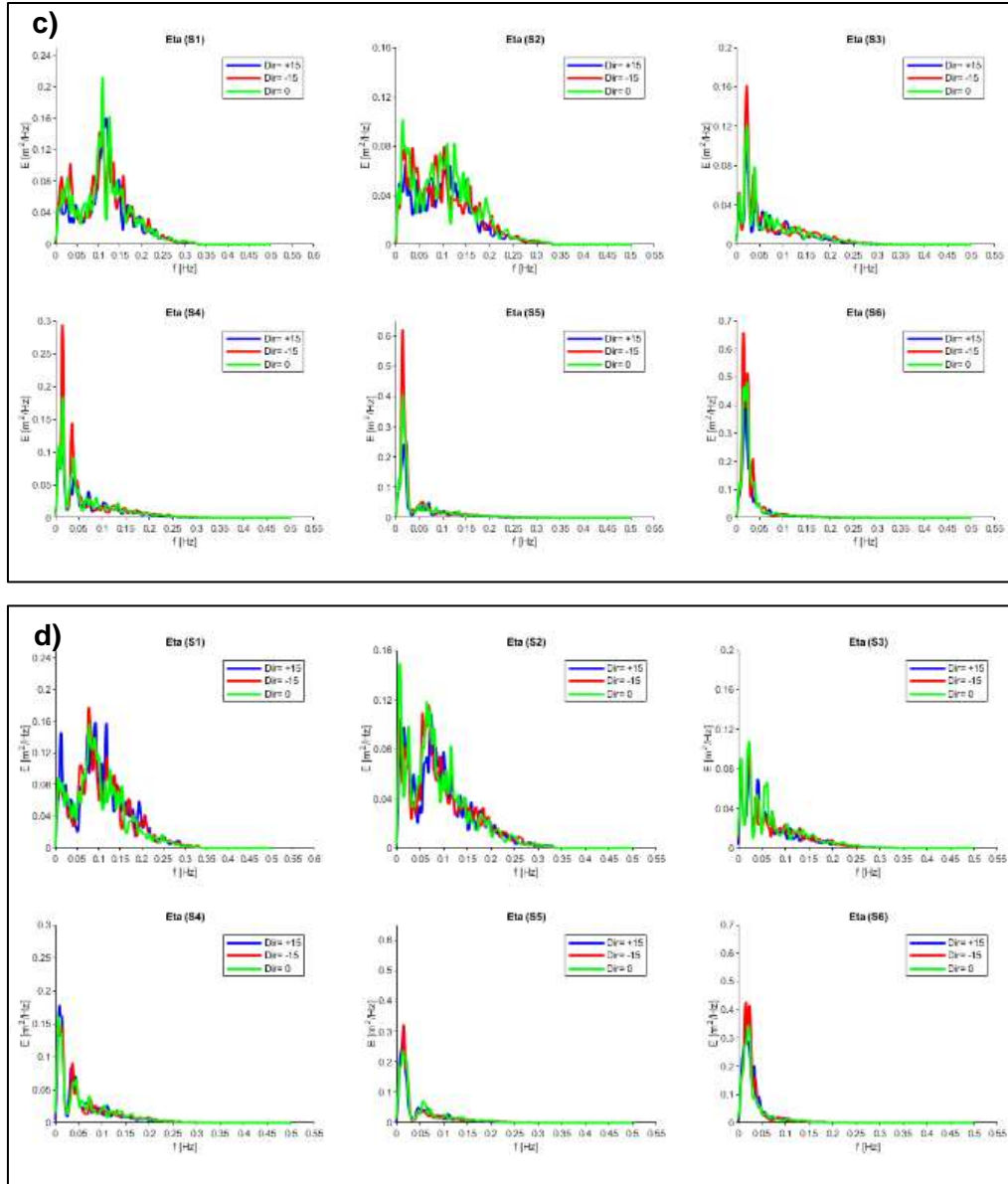


Otro escenario analizado consistió en variar la dirección de incidencia del oleaje contra H_s y T_p . Donde las Figuras correspondientes a los subíndices a y b están asociadas a los estados donde se evalúa una H_s de 0.5 m con variación de T_p de 8 s y 12 s, para 3 cambios de dirección de incidencia del oleaje que son +15° (línea azul), 0° (línea verde) y -15° (línea roja), mientras que en c) y d) se evaluó una H_s de 1.5 m y variaciones del periodo pico de 8 s y 12 s, para los mismos 3 cambios en la dirección de incidencia del oleaje. Para estos estados, como se puede ver en las Figuras 24, los espectros de la superficie libre muestran que para los puntos S1 y S2 de la Figura 24 a, existe una marcada incidencia de la banda gravitatoria pero posteriormente se disipa en los otros puntos hasta mostrar la incidencia absoluta de la banda IG en cercanías a la costa. Cuando se aumenta el periodo

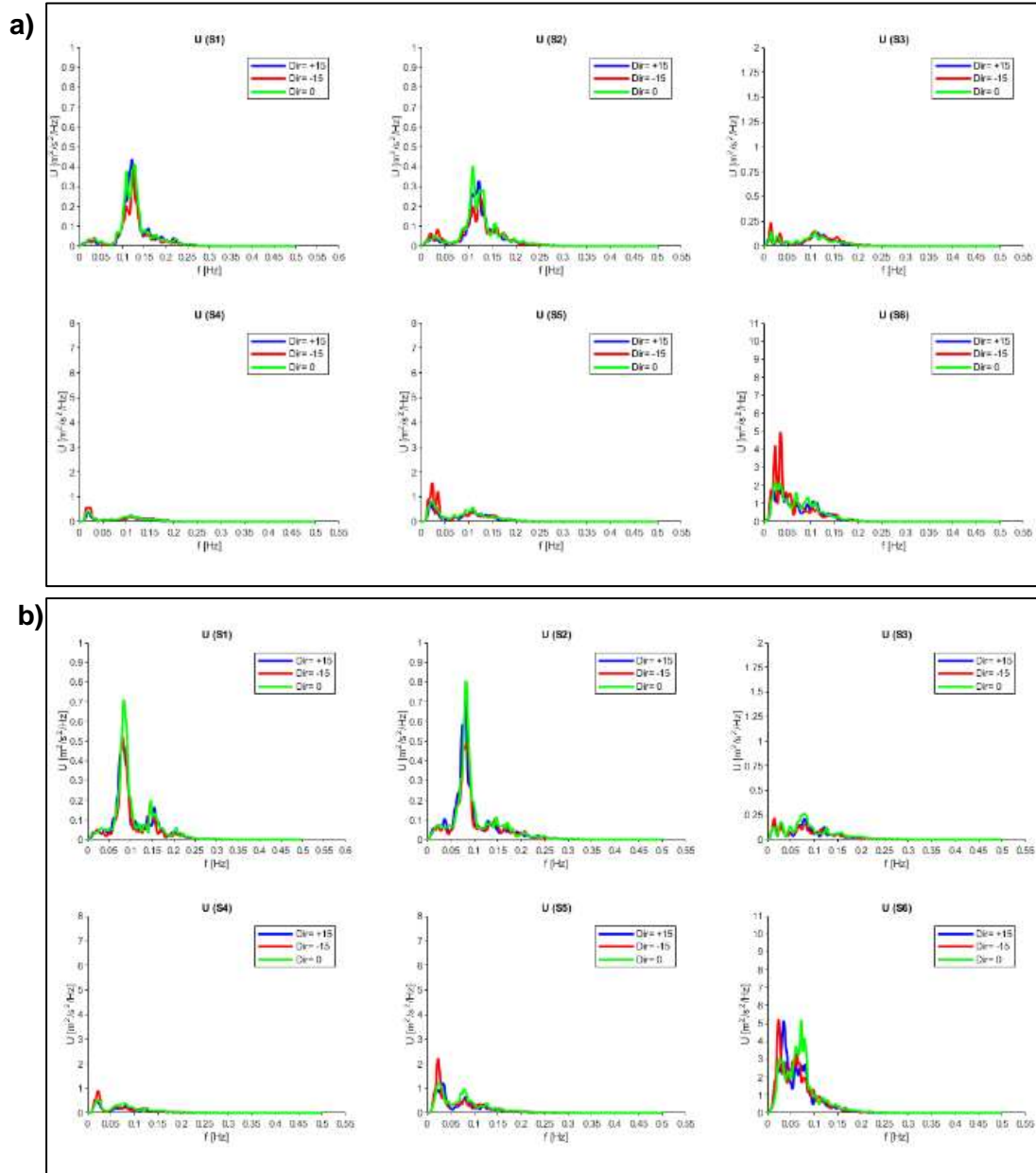
pico en esas mismas condiciones, como se puede ver la Figura 24 b, en el caso de S1 y S2 se observa que hay un pico de energía mucho más elevado que en la situación anterior, que continúa mostrando la predominancia de la banda G pero esta vez más cerca de las bajas frecuencias. Y para las Figura 24 c y 24 d, al ser un escenario distinto que la dos anteriores, efectivamente se observa la diferencia en los puntos S1 y S2, donde ya no solo se observa un gran pico de energía para la banda G sino que también empieza a mostrar energía asociada a bajas frecuencias, por ello al seguir la evolución en los demás puntos (S3, S4, S5 y S6) se logra ver que a medida que se acerca a la costa los picos de energía espectral asociada a la banda IG son más elevados, hasta el punto de seguir mostrando que incluso en estas nuevas condiciones las bajas frecuencias continuarían dominando los procesos costeros de esta playa.

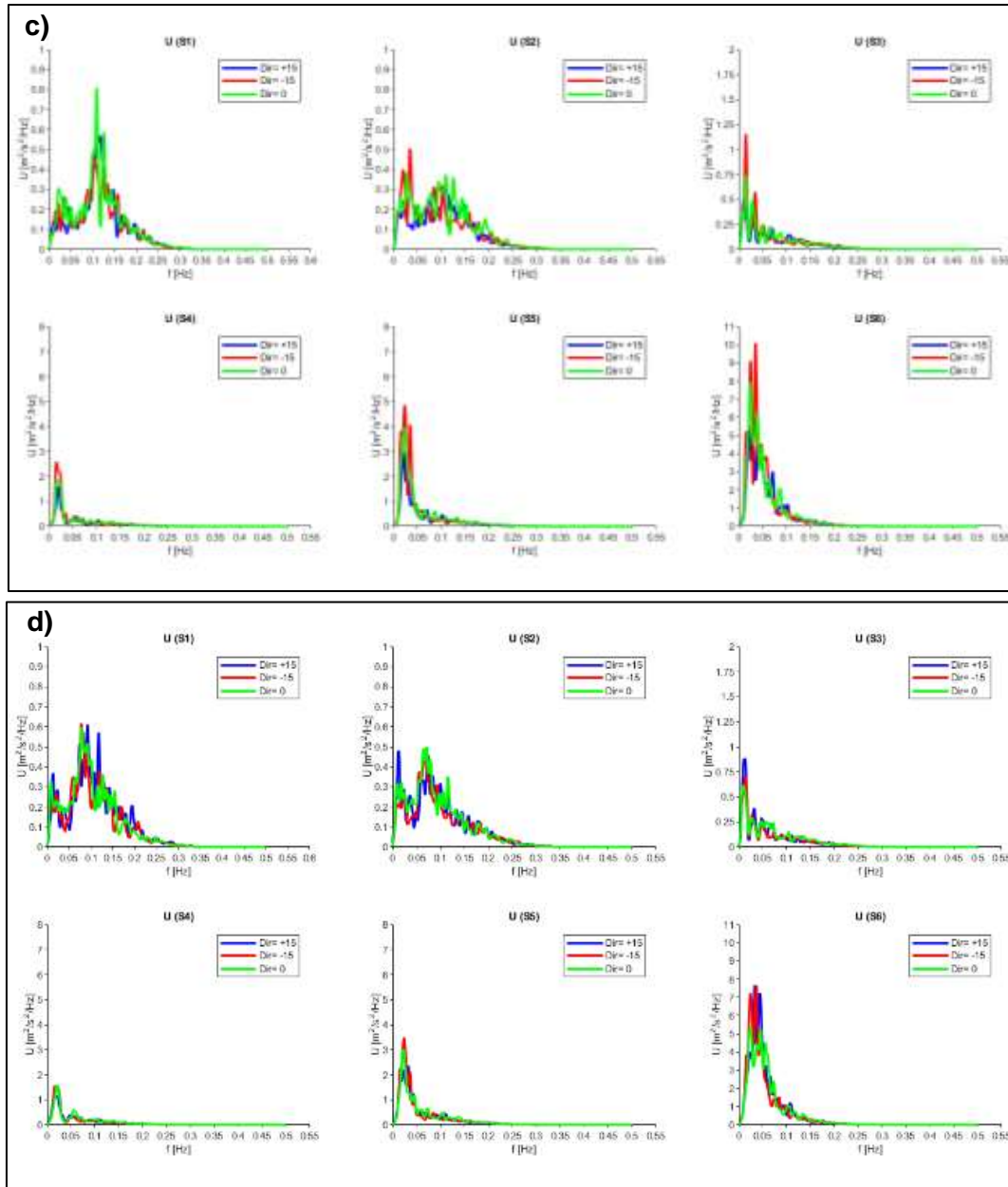
Figura 24: Comparación de espectros de energía de la superficie libre variando Dirección vs Hs y Tp.





Para el escenario de los espectros de energía de u se logra observar que tienen el mismo comportamiento en los tres primeros puntos (S1, S2 y S3) que los de la superficie libre, sin embargo, en los tres puntos restantes (S4, S5 y S6) se logra observar un aumento progresivo del pico de energía de la banda infragravitatoria al punto que en S6 comparado con S5 hay un incremento de casi el doble en los niveles de energía. Esto sucede tanto para lo registrado en Figura 25 a y 25 b como para Figura 25 c y 25 d. Se propone que este comportamiento se deba a que en la zona del punto S6 (a 6 metros de la costa) haya un mayor número de ondas infragravitatorias remanes, producto del reflejo del oleaje en la costa.

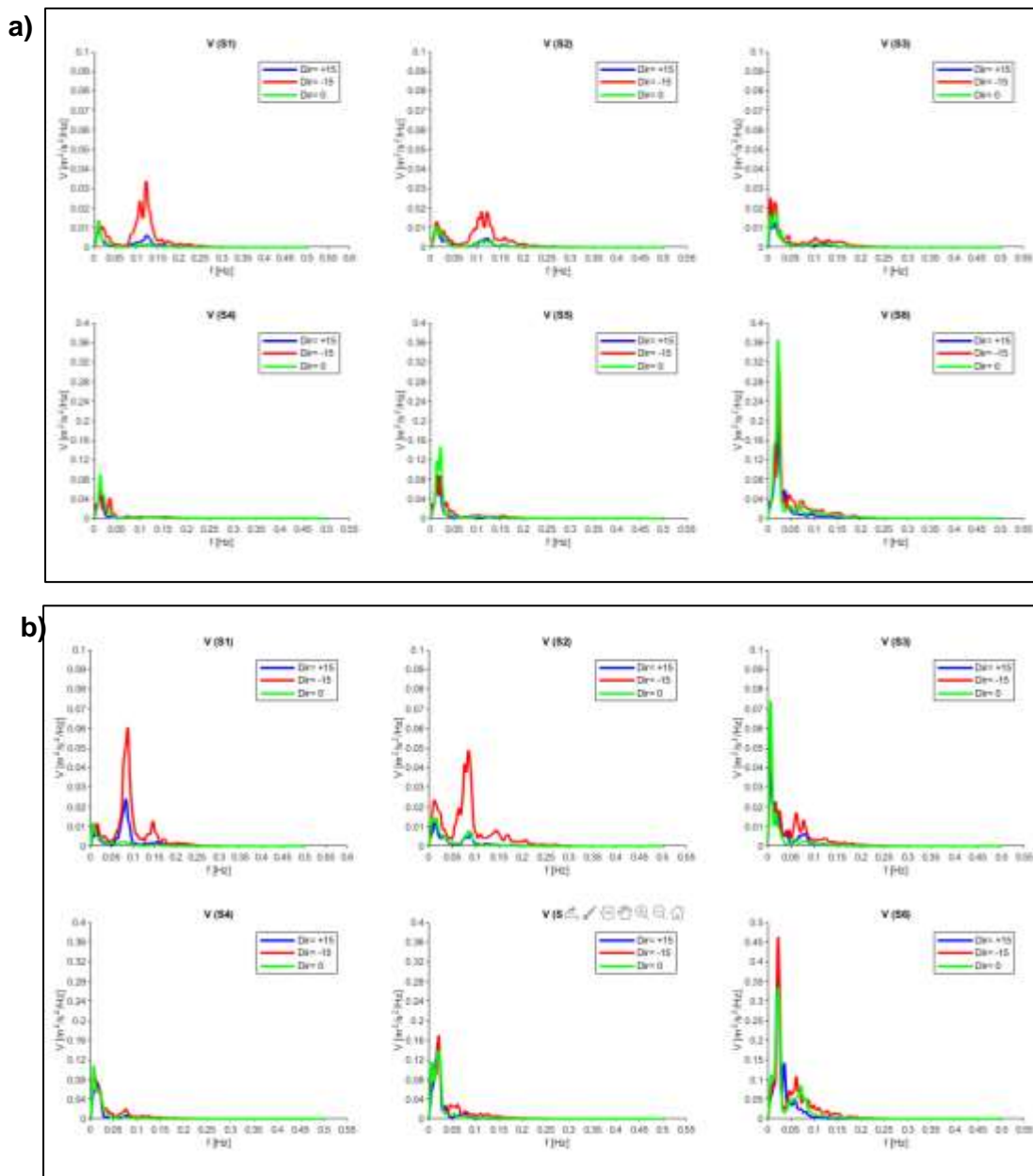
Figura 25: Comparación de espectros de energía de u variando Dirección vs Hs y Tp.

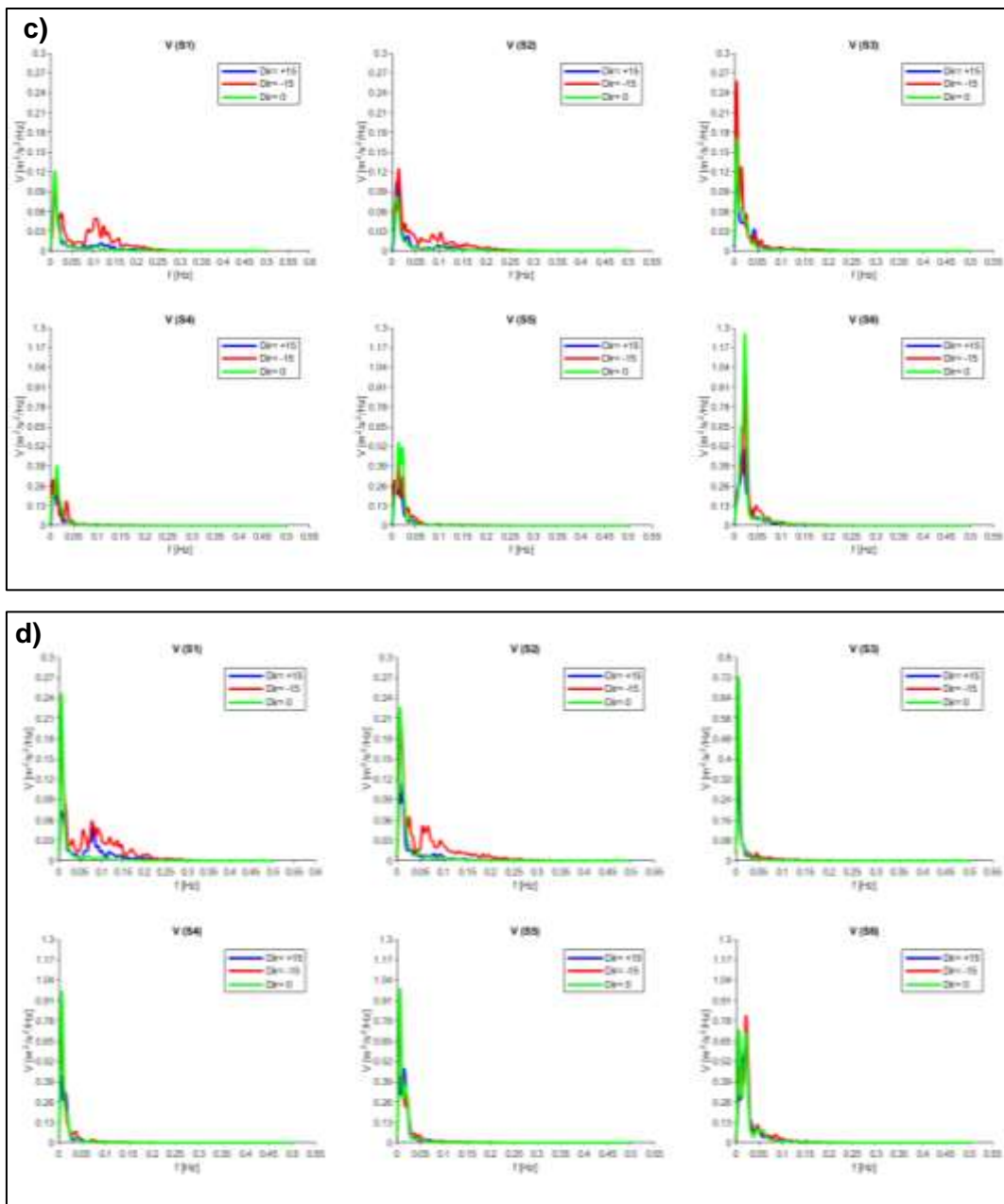


Esta hipótesis planteada puede ser validada con el comportamiento de los espectros de energía de v puesto que estos tienen la misma tendencia que lo generado para las velocidades transversales. Se continúa observando dos picos de banda gravitatoria en S1 y S2 (para las cuatro Figuras 26) y para los 3 últimos (S4, S5 y S6) se observa el aumento de la influencia de la banda IG y nuevamente en S6 se detalla un gran aumento en los niveles de energía. Como se planteó al inicio de este párrafo, esto permitiría validar el hecho de encontrar abundante energía de baja frecuencia producto de estar muy cerca de la zona de reflexión del oleaje, consistente al presentarse dos escenarios casi que idénticos. Nuevamente, al generar otros escenarios en estas playas de Costa Verde continua la

tendencia de un dominio absoluto de las bajas frecuencias en cercanías de la costa. Todo esto favorecido por ser una playa intermedia-reflejante que genera procesos de reflexión en la costa, ocasionando que una parte de la energía asociada a las bajas frecuencias se mantenga atrapada en la zona. Además, que hay procesos continuos de destrucción del oleaje que viene viajando en grupo y al romperse generan presencia de ondas IG.

Figura 26: Comparación de espectros de energía de v variando Dirección vs H_s y T_p .



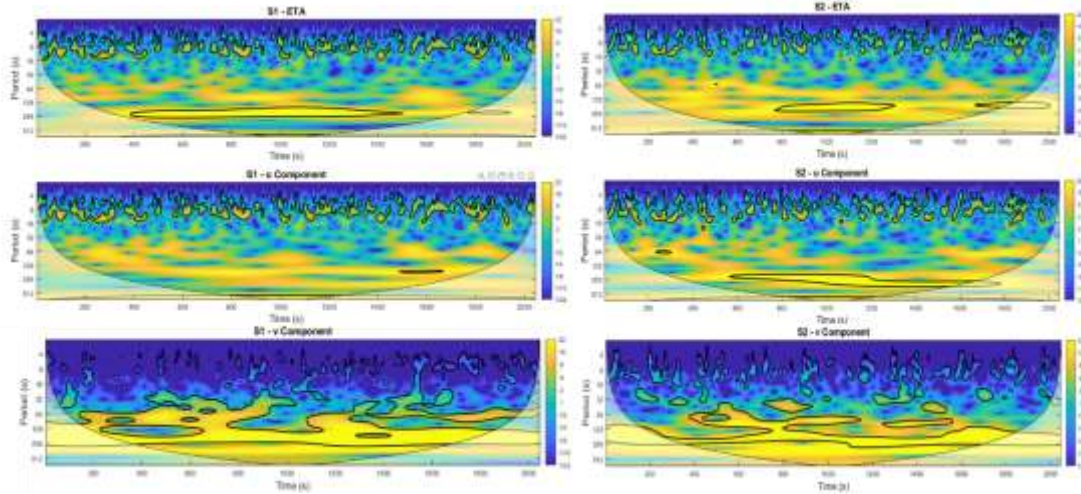


6.3.3 Análisis del oleaje con la Transformada Continua de Wavelet

Con el análisis de Wavelet se obtuvieron una serie de resultados que darán a conocer los procesos de energía asociados a la llegada del oleaje a la costa y que permitirán clasificar cuales son los tipos de ondas infragravatorias que están llegando a las playas de Costa Verde en sus condiciones normales e incluso para otros escenarios de clima marítimo. Las Figuras 27, 28 y 29 muestran el espectro de wavelet de la superficie libre y de las velocidades transversales y longitudinales para

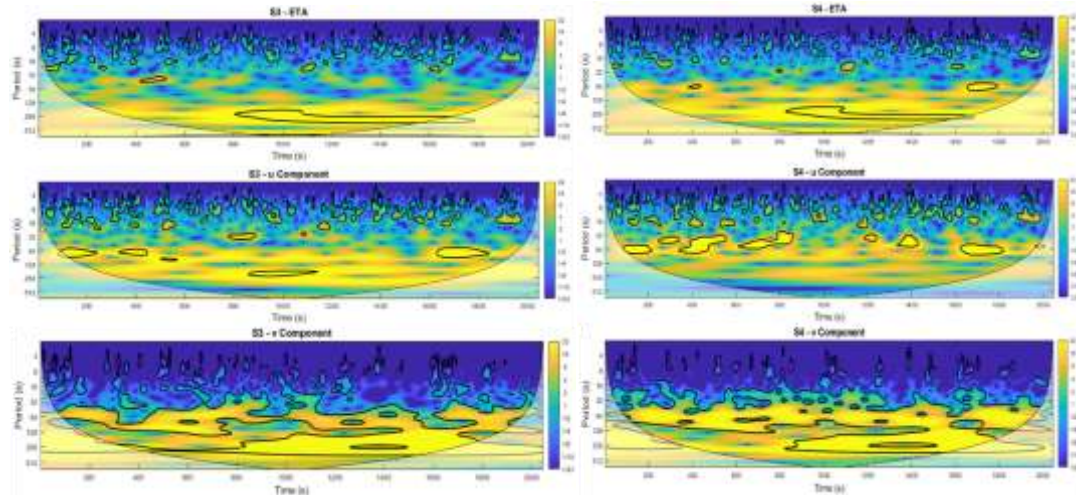
cada uno de los puntos de control. En ellas se puede observar la evolución de la energía del oleaje a medida que este se va acercando a la playa de Costa Verde.

Figura 27: Espectro de wavelet para η , u y v en S1 y S2.



En la Figura 27 en S1 se puede observar que la mayor parte de la energía registrada (para η y u) en esta zona es asociada a altas frecuencias (bajos periodos). Para S2, que está localizada en la zona donde el oleaje ya empieza a sentir el fondo, aún hay predominancia de energía de altas frecuencias, pero empieza a registrarse mayor incidencia de la banda infragravitatoria entre los rangos de 128 s a 256 s sobre todo en el espectro de la velocidad longitudinal, donde es evidente su contribución.

Figura 28: Espectro de wavelet para η , u y v en S3 y S4.

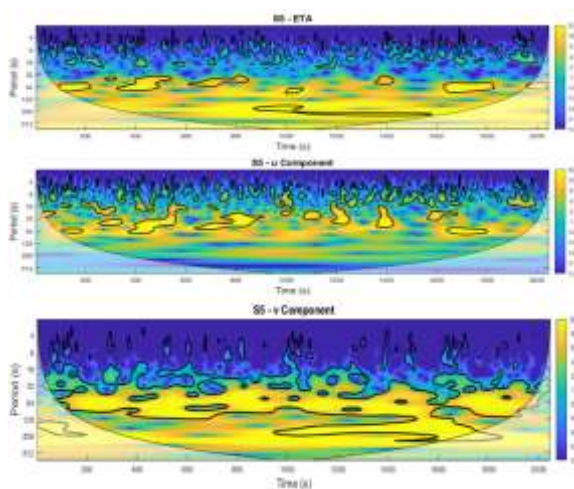


Para el punto S3 en la Figura 28 se observa que disminuye considerablemente la energía asociada a altas frecuencias e incrementa un poco la influencia de la energía infragravitatoria para la superficie

libre y la velocidad transversal entre las bandas de 128 s y 256 s. Es interesante destacar que la energía reducida de las ondas gravitatorias, no se ha traducido por completo en energía IG, porque se está experimentando procesos donde hay disipación de energía producto de la fricción del oleaje con el fondo y rotura del oleaje. En S4 se muestra que continua una reducción de la incidencia de las ondas gravitatorias, así como un incremento en leve de la energía infragravitatoria en especial la superficie libre.

En la Figura 29 se termina de ver la evolución del oleaje donde se puede destacar que en S5 los espectros tienen poca incidencia de la energía gravitatoria en cada uno de los parámetros y por el contrario se observa mayor influencia de la energía IG. Estos resultados son consistentes con los espectros de densidad de energía obtenidos con técnicas de Fourier, permitiendo mostrar que efectivamente en condiciones normales en principio hay una gran influencia de la energía gravitatoria pero posteriormente la energía IG toma gran parte del dominio de los procesos costeros en las playas de Costa Verde.

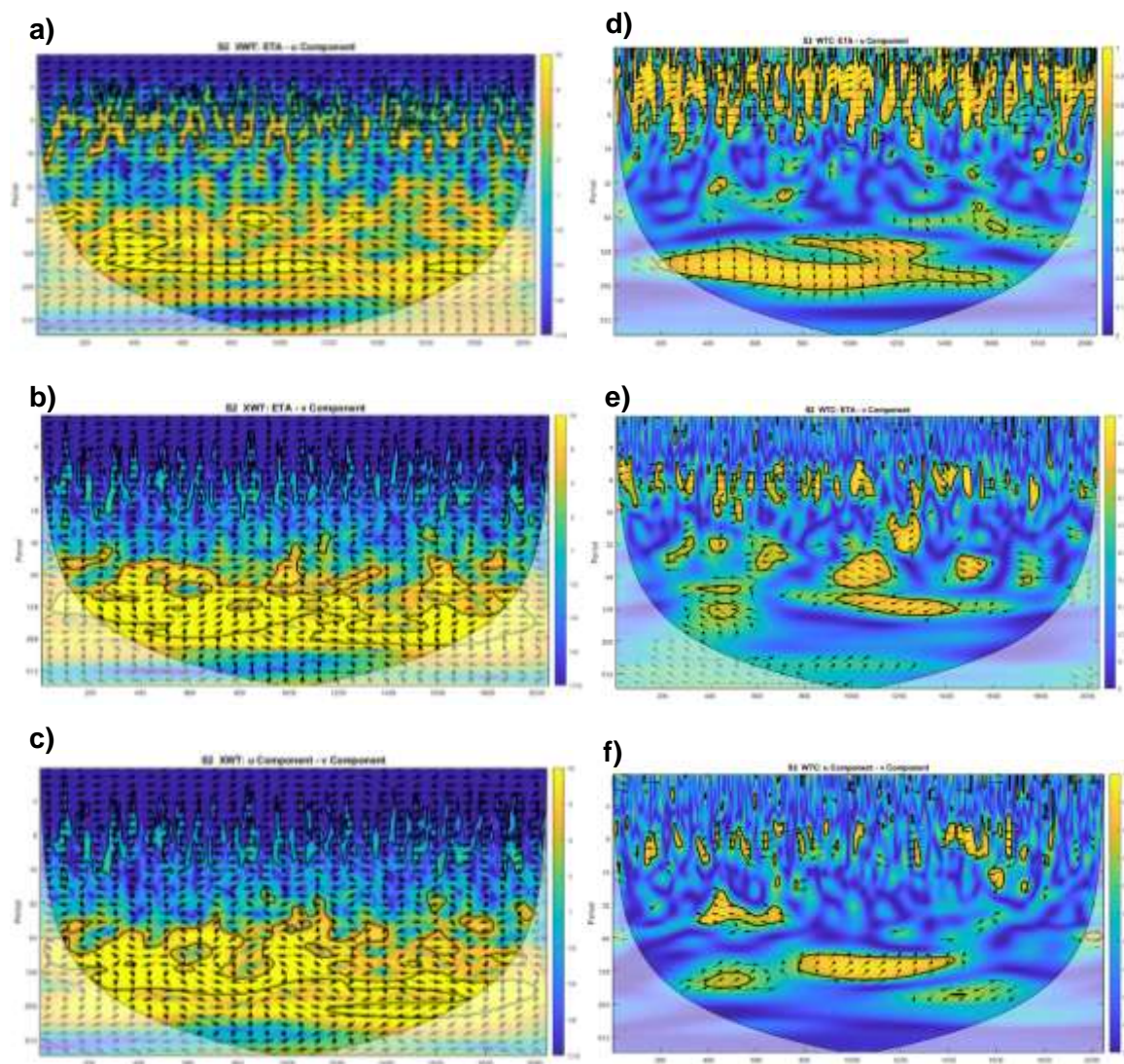
Figura 29: Espectro de wavelet para η , u y v en S5.



Con el fin de identificar cuales son el tipo de onda infragravitatoria que inciden en la playa, se utilizó la correlación cruzada y el análisis de coherencia de wavelet para poder determinarlas. En la Figura 30 se muestra la correlación cruzada y el análisis de coherencia entre la superficie libre y las velocidades transversales y longitudinales para el punto S2. En esta posición para la correlación cruzada entre la superficie libre y la velocidad transversal (ver Figura 30 a) presenta la correlación más alta entre la banda de 128 s y 256 s con un desfase de 90° . El análisis de coherencia muestra una situación similar para esos mismos valores entre bandas, lo que permite inducir una gran significancia entre esa relación de series. Esta misma situación se logra observar para la correlación

cruzada entre η y v (ver Figura 30 b) donde se evidencia una gran relación entre las mismas bandas y nuevamente el análisis arroja un desfase de 90° . Para el caso del espectro de coherencia, esta relación no se muestra significativa pero no permite desestimar los resultados previos porque se logra observar algunos agrupamientos muy cercanos a la banda de 128 s. Y para la correlación cruzada entre u y v , los valores más altos se encuentran otra vez entre las bandas de 128 s y 256 s con un desfase de 0° o 180° .

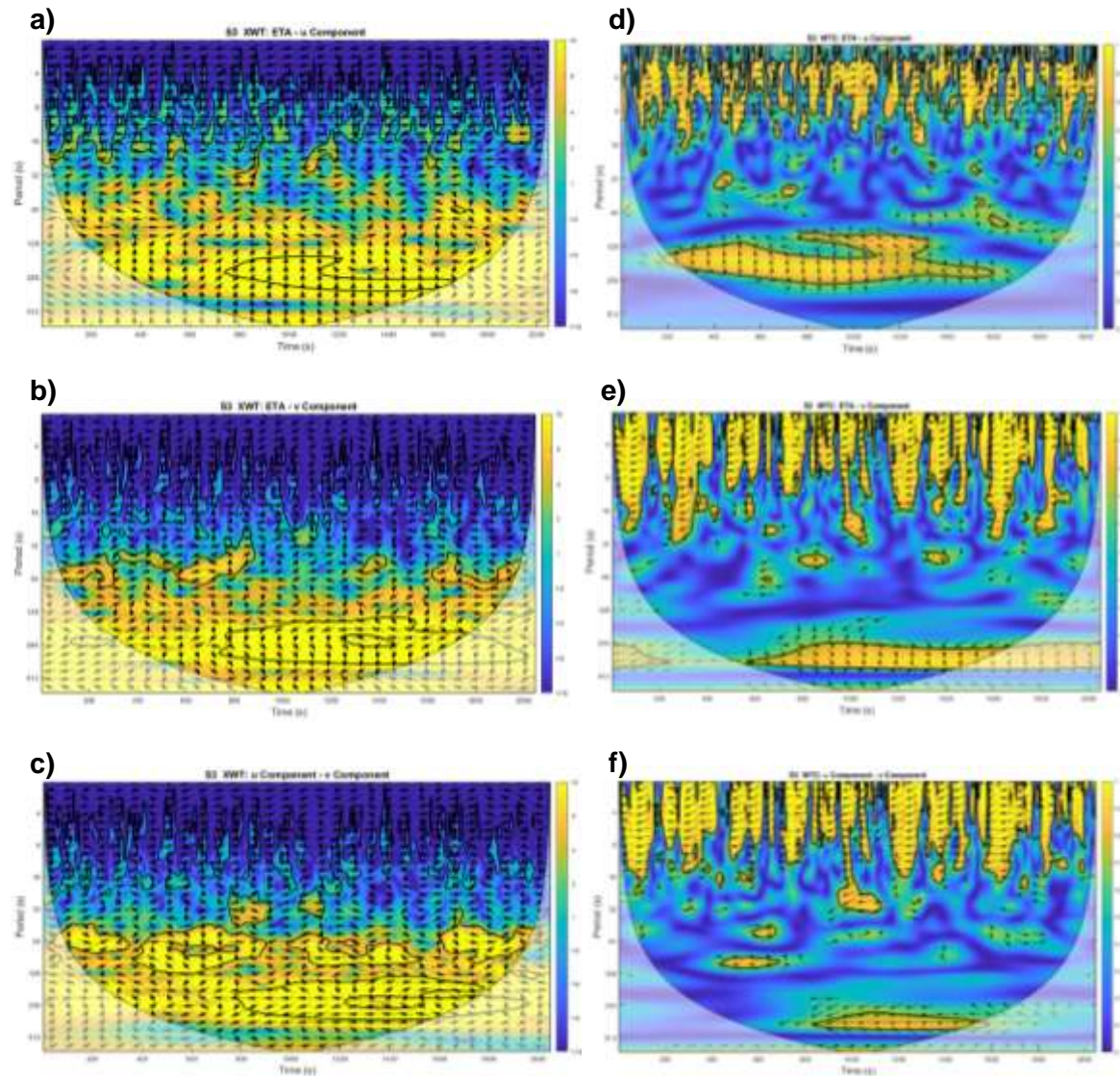
Figura 30: Espectros de correlación cruzada (a, b y c) y análisis de coherencia (d, e y f) para el punto S2.



En el caso de S3 las correlaciones cruzadas de η vs u (ver Figura 31 a), η vs v (ver Figura 31 b) y de u vs v (ver Figura 31 c) muestran que hay un gran emparejamiento de las señales con periodos de 128 s y 256 s para los 3 casos. Al entrar a evaluar cada uno de los emparejamientos se encuentra que

el espectro cruzado de η vs u muestra un desfase 90° , para el cruce de η vs v se halla un desfase -90° y en el caso de la relación u vs v se muestra un desfase de 0° o 180° . El análisis de coherencia muestra que para los dos primeros casos (η vs u y η vs v) hay un alto nivel de significancia para la relación entre ese par de series, no obstante, para el tercer caso (u vs v) la relación no se muestra tan fuerte, pero evidencia algún tipo de relación en bandas superiores a los 256 s.

Figura 31: Espectros de correlación cruzada y análisis de coherencia para el punto S3.

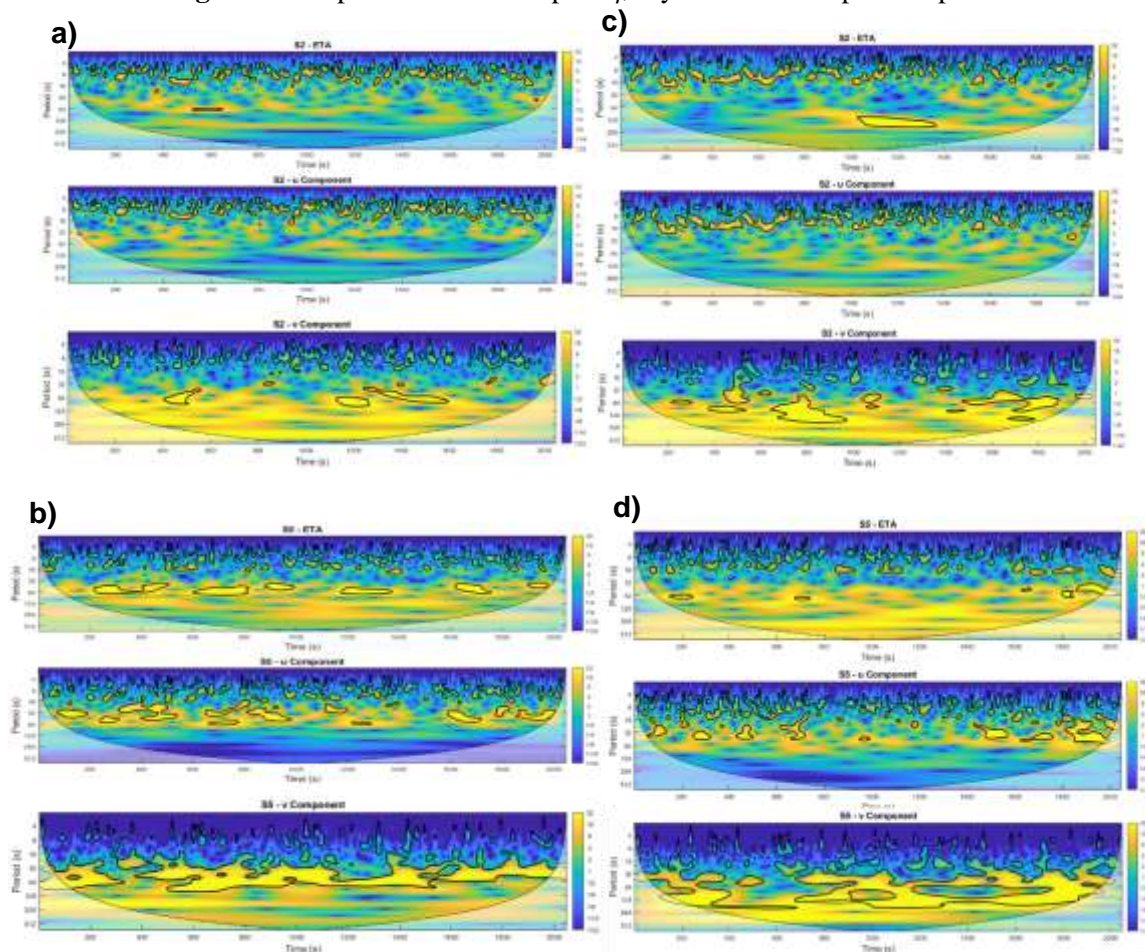


Teniendo en cuenta que hay un alto nivel de consistencia entre los resultados arrojados para cada una de las variables estudiadas (η , u y v) en el punto S2 y S3 y comparándolo con “la relación de fases que permiten distinguir el tipo de onda IG” propuesto por (Winter et al, 2017). Esto permite identificar que en condiciones de régimen medio en las playas de Costa Verde hay influencia de

ondas infragravitatorias libre estacionarias transversales y longitudinales (*Cross-Shore and Alongshore Standing Leaky Infragravity Waves*) y ondas de borde estacionarias transversales y longitudinales (*Cross-Shore and Alongshore Standing Edge Waves*).

Cuando se toma otros escenarios de clima marítimo, donde se varía el periodo pico o la dirección de incidencia del oleaje, los espectros de wavelet muestran que para el caso de las Figura 32 a y 32 b que representan las condiciones de H_s de 1.5 m y dirección de $+15^\circ$ para un periodo pico de 8 s, mientras que las Figuras 32 c y 32 d presentan las mismas condiciones de H_s y dirección, pero para un periodo de 12 s.

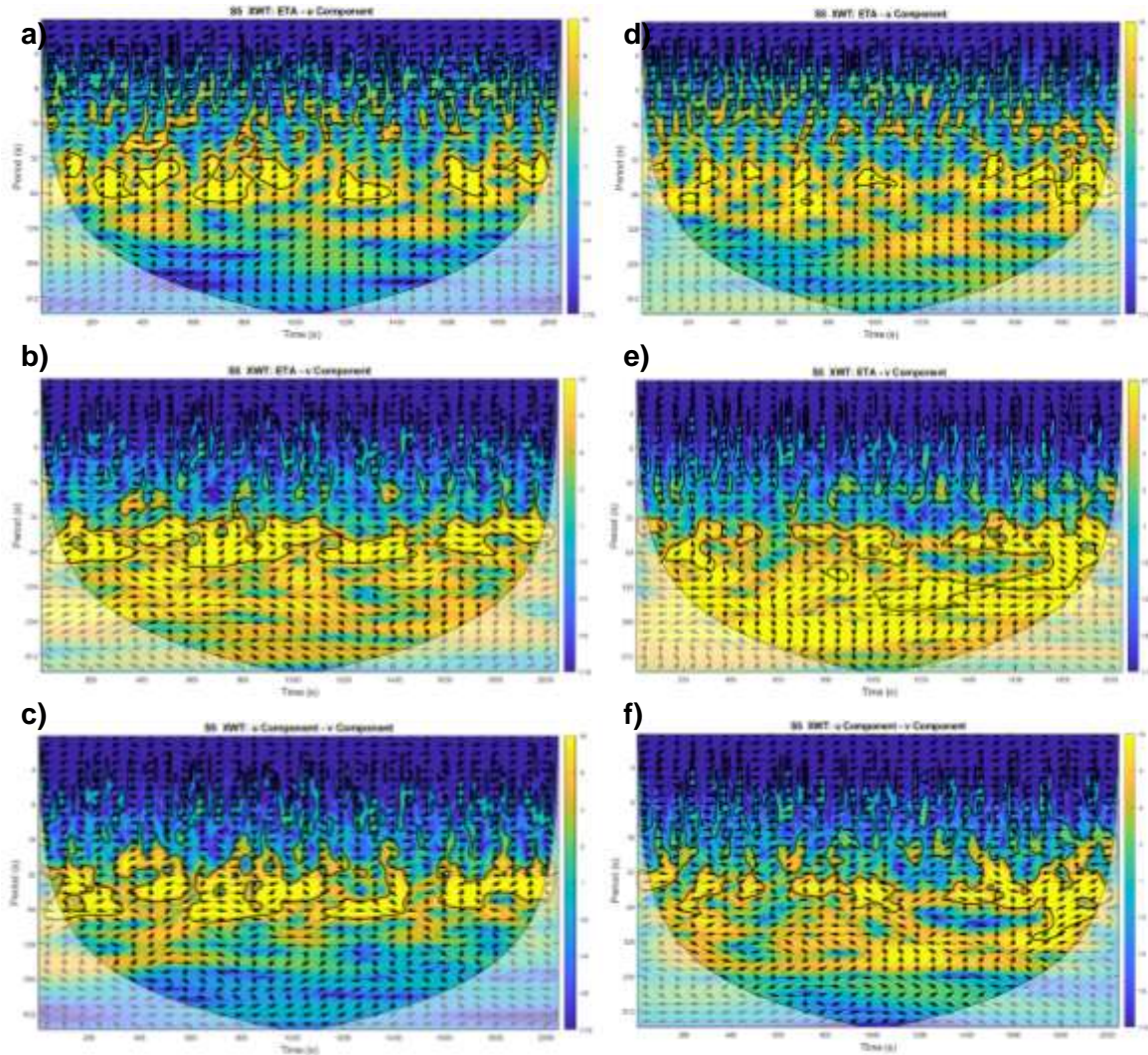
Figura 32: Espectro de wavelet para η , u y v variando el periodo pico.



En esta comparación se puede destacar que para el escenario donde el periodo es 12 s, la banda IG se evidencia mucho más especialmente para el espectro de la superficie libre y la velocidad longitudinal. Y en común se puede destacar que está vez la concentración de energía infragravitatoria se centra en la banda del periodo de 64 s.

En el caso del análisis de la correlación cruzada las Figuras 33 a, 33 b y 33 c representan las condiciones para periodo de 8 s mientras que las Figuras 32 d, 32 e y 32 f están asociadas al periodo de 12s. En esta comparación se puede observar que hay una gran correlación para todas las relaciones de fases (η vs u , η vs v y u y v) en la banda de señales asociadas al periodo de 64 s.

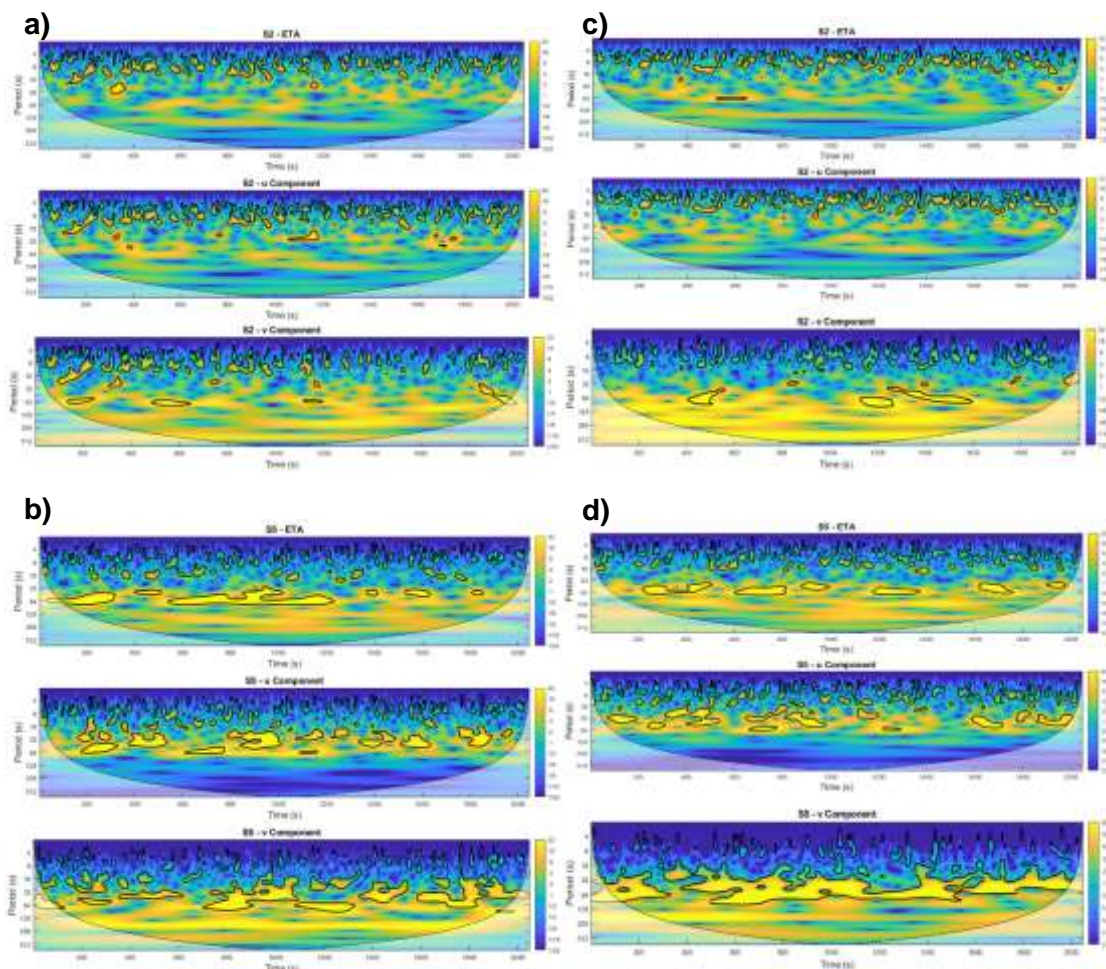
Figura 33: Comparación de espectros de correlación cruzada para variación de periodo pico



En cuanto al desfase se muestra que para los espectros de las Figuras 33 a y 33 d, es de 90° . Para la correlación de η vs v tanto en la Figura 33 b como 33 e se muestra un desfase entre 0° o 180° y para la relación de fase entre u vs v se obtiene un desfase de 90° . Estas condiciones permiten inferir que con una variación en el periodo pico del oleaje, las ondas IG que afectan a la costa también varían puesto que con estas condiciones según la metodología de Winter et al, 2017 el tipo de onda IG que se presentan son: ondas libres estacionarias transversales (*Cross Shore Standing Leaky*

Infragravity Waves), ondas libres progresivas longitudinales (*Alongshore Progressive Leaky Infragravity Waves*) y ondas de borde progresivas transversal y longitudinalmente (*Cross Shore and Alongshore Progressive Edge Waves*).

Figura 34: Espectro de wavelet para η , u y v variando dirección de incidencia del oleaje

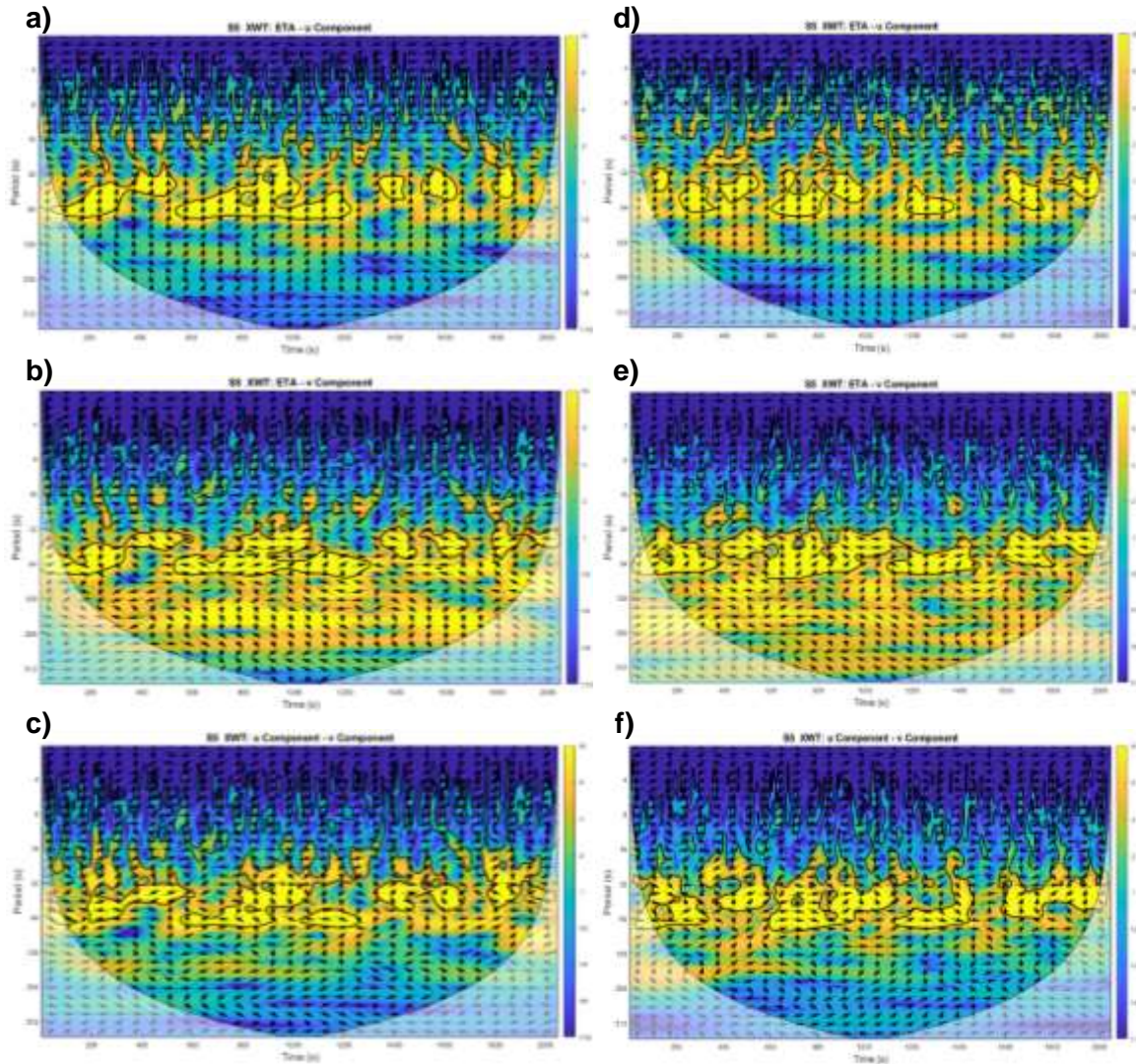


En el otro escenario modelado donde se varía la dirección de incidencia del oleaje se encontró que los espectros de wavelet muestran que para el caso de las Figura 34 a y 34 b representan las condiciones de H_s de 1.5 m y periodo pico de 8s para una dirección de incidencia de -15° , mientras que las Figuras 34 c y 34 d presentan las mismas condiciones de H_s y periodo pico, pero para una dirección de incidencia de 0° .

En este caso se puede mencionar que los espectros de wavelet para el punto S2 en todos los parámetros marca una muy baja influencia de energía IG inclusive en la velocidad longitudinal que en escenarios anteriores siempre ha mostrado la influencia de este tipo de energía de manera

evidente. Sin embargo, ya en el punto de control S5 para todos los parámetros se hace visible la incidencia de la energía IG en la banda de las señales asociada a periodos de 32 s.

Figura 35: Comparación de espectros de correlación cruzada para variación en la dirección de incidencia del oleaje.



En el análisis de la correlación cruzada, las Figuras 35 a, 35 b y 35 c representan las condiciones para la dirección de incidencia de -15° mientras que las Figuras 35 d, 35 e y 35 f están asociadas a dirección de incidencia de 0° . En esta comparación se puede observar que hay una gran correlación para todas las relaciones de fases (η vs u , η vs v y u y v) en la banda de señales asociadas entre los periodos de 32 s y 64 s.

Finalmente, en la relación de fase se encuentra que los espectros de wavelet de la Figura 35 a y 35 d donde se analiza η vs u , se muestra un desfase de 90° , para el cruce η vs v se tiene que la Figura 35

b y 35 e evidencian un desfase de 0° o 180° y para la correlación cruzada entre u vs v se tiene que el desfase es algo difuso para Figura 35 c mientras que para la Figura 35 f se tiene un desfase de -90° o 90° . Teniendo en cuenta estos resultados y al no tener completamente claro el análisis de correlación cruzada para la Figura 35 c, no se puede concluir con un grado de certeza absoluto que las ondas IG incidente para este escenario sean las mismas que el caso anteriormente expuesto.

7. Discusiones

En este trabajo se calcularon los parámetros medios para la H_s tanto en aguas someras (H_s entre 0.4 y 0.6 m y proviene de ENE) como aguas profundas (H_s entre 1.25 y 1.75 m proveniente de NNW). Estos factores permitieron dar paso a una posterior obtención del número de Iribarren tanto para aguas profundas como aguas someras con el fin de identificar el tipo de rotura del oleaje en esta playa. Estos cálculos arrojaron que para aguas profundas el tipo de rotura predominante es en descrestamiento y para aguas someras varía entre voluta y descrestamiento. Estos resultados son típicos de una playa intermedia reflejante y a su vez consistentes con estudios previos realizados en la zona como los de Guerrero Peña, (2017) y Ruiz-Merchán et al, (2019).

Para la obtención del estado morfodinámico de la playa se utilizó el parámetro adimensional de velocidad de caída de sedimento en playas micromareales (Ω) expuesto por Wright & Short, 1984 con el que se establece que esta playa es intermedia reflejante de tipo Barra Canaleta. En este tipo de playa se esperaría la presencia de pequeños canales debido a que se generan algunas corrientes de retorno a lo largo de la línea de costa. Además, se espera que en las terrazas que se desarrollan, el comportamiento sea disipativo, mientras que en el talud sea completamente reflejante. Otro fenómeno que se espera que se desarrolle en la línea de costa producto de las oscilaciones rítmicas longitudinales sea la presencia de cusps (Falqués et al., 2000) muy pronunciados, que es una característica morfológica típica para este tipo de playas.

De los resultados obtenidos del modelo SWASH se puede mencionar que el análisis de las señales resultantes de los distintos escenarios modelados y procesados con técnicas de Fourier permiten destacar que para las condiciones normales los espectros de densidad de energía de las zonas de los puntos S1 y S2 (en especial la superficie libre y la velocidad transversal) identifican la predominancia de la energía sea-swell pero muestra también la influencia en estos puntos de la energía IG. En cambio, para la velocidad longitudinal se obtuvo en casi todos los puntos evaluados un dominio absoluto de la energía IG. En los puntos posteriores desde S3 hasta S6 en cualquiera de los

parámetros analizados (η , u y v) se va evidenciado el incremento de la energía infragravitatoria hasta llegar a la costa, no obstante, esto no implica que la energía gravitatoria se haya disipado por completo. Estos resultados son consistentes a estudios previos realizados por Montaña Muñoz, 2015 en los que menciona que efectivamente hay un incremento de la energía IG en cercanías a la costa y que además estas condiciones pueden ser mayores dependiendo de lo que ocurra previamente en offshore. Para los otros escenarios de clima marítimo modelados, se puede decir de manera general que presentan el mismo comportamiento con algunas diferencias en los picos de energía en los dos primeros puntos de análisis (S1 y S2) pero continua la tendencia del incremento de la energía infragravitatoria en cercanías a la costa.

De este análisis de señales se puede discutir acerca de las condiciones hidrodinámicas de Costa Verde que efectivamente en esta playa intermedia reflejante se presentan ondas infragravitatorias, que se pueden estar generando posterior a la rotura de la estructura de grupo de ondas sea-swell que viene viajando con celeridad de grupo y al romperse se desprende el oleaje libre que genera la onda IG como proponen Baldock & Huntley, (2002), Masselink, (1995) y Battjes, (2004). Por otro lado, estas ondas pueden estar generándose por un cambio en la variación en el tiempo del punto de rotura (Symonds et al., 1982), ocasionando que el oleaje libre, viaje hasta la costa y sea reflejado, o en su defecto quede atrapado por refracción y permanezca a lo largo de la costa como una onda de borde. Para el caso de la velocidad longitudinal ocurre un proceso completamente dominado por ondas IG, y la morfología de la línea costera estaría siendo definida por las ondas infragravitatorias. Adicionalmente, se encuentra que cuando se modifican las condiciones de régimen medio y se pone a variar el periodo pico dejando constante la dirección de incidencia del oleaje y la altura significativa, los resultados muestran que la superficie libre independiente del periodo en el que se encuentre, los espectros son casi idénticos, pero la velocidad longitudinal y transversal, si evidencian que sus niveles de energía cambian llegando a ser más elevados que en condiciones normales, en especial la velocidad longitudinal. Esto se debe a que entre más grande es el periodo, mayor es el flujo de energía que es capaz de arrastrar la ola, por ende, cuando esta se va asomerando puede que incremente su altura antes de llegar a romper. Y para la situación donde se modifica la dirección de incidencia del oleaje y se mantiene el periodo y la altura significativa, se encontró que los niveles de energía no se modifican independientemente desde que dirección proviene el oleaje, no obstante, la particularidad que se observa es que desde S4 a S6, se evidencia un aumento progresivo de los niveles de energía para cualquier dirección de incidencia. Esta situación probablemente esté ocurriendo porque en estas direcciones de incidencia el proceso de asomeramiento es más largo y

tan solo empieza a romper la ola en cercanías a la costa, produciendo que los mayores niveles de energía se den en los puntos S5 y S6.

Por otro lado, de los análisis de relación de fases ejecutados con la transformada de wavelet para conocer los procesos de energía asociados a la llegada del oleaje a la costa para las series de superficie libre, velocidad transversal y longitudinal se obtuvo que para las condiciones normales hay una alta correlación en la banda de la señal asociada a periodos entre 128 s y 256 s que marcan evidentemente la presencia de energía IG (se empieza a notar desde S2) y que los espectros desde S1 hasta S6 van mostrando nuevamente esa evolución de energía gravitatoria (con mayor incidencia en los tres primeros puntos S1, S2 y S3) hacia energía infragravitatoria (con mayor incidencia en S5 y S6). Y del resultado de las correlaciones cruzadas entre los tres parámetros (η , u y v) se encuentra que de acuerdo a (Winter, G. et al, 2017) se obtuvo que en estas condiciones hay influencia de ondas infragravitatorias libre estacionarias transversales y longitudinales (*Cross-Shore and Alongshore Standing Leaky Infragravity Waves*) y ondas de borde estacionarias transversales y longitudinales (*Cross-Shore and Alongshore Standing Edge Waves*). No obstante, cuando se hace el mismo análisis para otros escenarios de clima marítimo en el que se modifica el periodo pico y se mantiene la dirección de incidencia y la altura significativa se obtiene que esta vez hay correlación en las bandas de las señales asociadas a los periodos entre 32 s y 64 s, que continúan marcando ondas IG pero con mayor influencia de la energía gravitatoria. Se continúa viendo la presencia de energía IG a partir de S2 y la velocidad longitudinal sigue siendo dominada en su mayoría por bajas frecuencias. Del análisis de correlación cruzada para los tres parámetros (η , u y v) en este caso se encontró que las ondas IG que actuarían en la costa serían: ondas libres estacionarias transversales (*Cross Shore Standing Leaky Infragravity Waves*), ondas libres progresivas longitudinales (*Alongshore Progressive Leaky Infragravity Waves*) y ondas de borde progresivas transversal y longitudinalmente (*Cross Shore and Alongshore Progressive Edge Waves*). Para el otro escenario en el que se modificó la dirección de incidencia del oleaje y se mantuvo la altura significativa y el periodo pico, los análisis de transformada cruzada no permitieron concluir con un grado de certeza absoluto que las ondas IG incidente para este escenario sean las mismas que el caso anteriormente expuesto.

Estos resultados hidrodinámicos son consistentes e innovadores puesto que para el primer análisis arrojó lo mismo que el estudio previo realizado por (Ruiz-Merchán et al., 2019) y el segundo análisis donde se modifican las condiciones de régimen medio se pudo observar que cuando se mantiene las direcciones de incidencia normales (0° y $+15^\circ$) es posible identificar que tipo de onda infragravitatoria incide, mientras que cuando se cambian esas condiciones a -15° , no es posible denominar las ondas IG que están llegando a la costa. Profundizando un poco más en el análisis de

Wavelet se permite inferir que la concentración de energía IG en el punto S2 en varios de los espectros, valida la idea que efectivamente una vez llega el oleaje, este se refleja y se devuelve hacia aguas profundas (offshore). Este comportamiento sugiere que esta reflexión afecta directamente la hidrodinámica de la zona de surf dado que influye en los procesos de rotura y en la formación de ondas estacionarias (Ruiz-Merchán et al, 2019). Y para el caso de la presencia de energía G en los espectros de los puntos más cercanos como (S5 y S6) permiten inferir que en algunos casos la rotura del oleaje se da en cercanías a la costa favorecido por la pendiente de la playa y porque se experimenta alturas de olas pequeñas.

Finalmente, con mayor claridad del tipo de onda IG que afecta a la costa. Se encuentra que hay presencia de ondas estacionarias (*Standing Waves*) y ondas de borde (*Edge Waves*), dado su patrón rítmico se podría inferir que son las causantes de algunas de las corrientes de retorno que experimenta este tipo de playas o de los cusps que se generan en algunas épocas del año pero comparando con la literatura hay quienes dicen como Bowen, (1969) y Symonds & Ranasinghe, (2000) que las ondas IG junto con oleaje de onda corta pueden ser formadores de corrientes de retorno pero hay otros como que mencionan que no hay evidencia suficiente para atribuir a las ondas IG como las principales forzadores de este tipo de formas en la playa. (Coco et al., 2003; Coco, & Murray, 2007; Ruiz-Merchán et al., 2019). Se requiere tener certeza acerca de cuál es el papel de las ondas IG en la morfología de la playa y ya sabiendo de la existencia de las IG, ahora se necesita analizarlas exclusivamente para ver que otra información se podría obtener de ellas.

8. Conclusiones

Una vez condensado todo el análisis de las playas de Costa Verde, se puede concluir que éstas se caracterizan por presentar alturas de ola en aguas profundas entre 1.25 m y 1.75 m provenientes del NNW y en aguas someras se encuentra alturas de olas entre 0.4 m y 0.6 m provenientes de ENE. Con el número de Iribarren se obtiene que el tipo de rotura de oleaje predominante en la zona es descrestamiento y voluta. Y con el uso del parámetro de velocidad de caída del sedimento se pudo determinar que esta playa es intermedia reflejante con barras de canaleta. Esta caracterización de la playa permite describir que su morfología estará determinada por la presencia de canales de corrientes de retorno y patrones rítmicos conocidos como cusps.

Del análisis de señales se destaca que, en condiciones de régimen medio, la playa en cercanías a la línea de costa presenta una gran influencia de la energía infragravitatoria, sin dejar de lado la presencia de energía gravitatoria. Cuando las condiciones de régimen medio cambian se encontró que aún predominaba la presencia de IG en cercanías a la costa, pero se encuentra un mayor registro de la banda gravitatoria. A su vez, se observa de la presencia de energía infragravitatoria en los 3 parámetros medidos (η , u y v), en especial un dominio en las velocidades longitudinales, que permiten inferir que los procesos de transporte longitudinal para esta playa son controlados por la energía infragravitatoria. Adicionalmente, se encontró que cuando se cambian las condiciones normales y se tiene casos como la modificación en el periodo pico, se encuentra que, con aumento del periodo, los flujos de energía son mayores, ocasionando que a medida que vaya ocurriendo el asomeramiento del oleaje se puedan generar alturas de olas más grandes. Para los escenarios donde se modifica la dirección de incidencia, se encuentra que no hay modificaciones en ninguno de los tres espectros para cada dirección evaluada, pero si se evidencia que los mayores niveles de energía ocurren en los puntos S5 y S6, permitiendo sugerir que esto se deba a que los procesos de rotura llegan a producirse solo en cercanías a la playa.

Finalmente, del análisis de Wavelet se destaca que en los escenarios modelados para las condiciones normales se encontró que el tipo de onda infragravitatoria que incide en la playa son: ondas infragravitatorias libre estacionarias transversales y longitudinales (*Cross-Shore and Alongshore Standing Leaky Infragravity Waves*) y ondas de borde estacionarias transversales y longitudinales (*Cross-Shore and Alongshore Standing Edge Waves*). Pero, si estas condiciones normales cambian, se encuentra que para el caso de una modificación en el periodo pico y manteniendo la altura significativa y la dirección de incidencia (0° y 15°), el tipo de onda IG que incide cambia. Para esta situación se encontró que las ondas infragravitatorias incidentes serían: ondas libres estacionarias transversales (*Cross Shore Standing Leaky Infragravity Waves*), ondas libres progresivas longitudinales (*Alongshore Progressive Leaky Infragravity Waves*) y ondas de borde progresivas transversal y longitudinalmente (*Cross Shore and Alongshore Progressive Edge Waves*). Además, se encontró que para un escenario en el que se cambie la dirección de incidencia del oleaje a -15° y se mantenga la altura significativa y el periodo pico, las ondas IG que actuaran en ese caso, los espectros de la transformada cruzada no permiten concluir acerca de ello. A pesar de la presencia de este tipo de ondas como lo son las ondas estacionarias y las ondas de borde, que permitirían inferir que el registro de patrones rítmicos y de las corrientes de retorno están asociados a la creación de estas formas en la playa, no se ha logrado demostrar que, la coexistencia de este tipo de formas con la interacción de abundantes ondas IG en la zona, se puedan atribuir como factores desencadenantes de su formación.

9. Referencias

- Baldock, T. E., & Huntley, D. A. (2002). Long-wave forcing by the breaking of random gravity waves on a beach. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 458(2025), 2177–2201. <https://doi.org/10.1098/rspa.2002.0962>
- Battjes, J. A. (2004). Shoaling of subharmonic gravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 1–15.
- Bowen, J. (1969). *Rip Currents- Theoretical investigations*. 74(23), 5467–5478.
- Castellanos, O., Tomas, A., & Mendez, F. J. (2012). " AMEVA , a user friendly toolbox to analyze statistically environmental variables ". *Jornadas Sobre Cambio Climático y Comunicación. GRACCIE, October 2018*, 2–3.
- Coco, G. & Murray, A. B. (2007). Patterns in the sand: From forcing templates to self-organization. *Geomorphology*.
- Coco, G., Burnet, T. K., Werner, B. T., & Elgar, S. (2003). Test of self-organization in beach cusp formation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(3). <https://doi.org/10.1029/2002jc001496>
- Falqués, A., Coco, G., & Huntley, D. A. (2000). A mechanism for the generation of wave-driven rhythmic patterns in the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C10), 24071–24087. <https://doi.org/10.1029/2000jc900100>
- García, F., Palacio, C., & Garcia, U. (2011). *Tide Constituents At Santa Marta Bay*. 142–150.
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561–566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Guerrero Peña, M. Y. (2017). Clasificación morfológica e hidrodinámica de las playas del caribe colombiano. In *Universidad del Norte* (Vol. 01). <http://www.albayan.ae>
- Hanson, H., & Kraus, N. C. (2011). Long-term evolution of a long-term evolution model. *Journal of Coastal Research, SPEC. ISSUE 59*, 118–129. <https://doi.org/10.2112/SI59-012.1>
- Hashimoto, H., et al. (1971). *Study on the prediction of the longshore transport rate*. Report of the 25th Engineering Meeting of the Ministry of Construction, Japan, pp 517-541.
- Hasselmann, K. (1962). On the non-linear energy transfer in a gravitywave spectrum: Part 1. General theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 481–500.
- Iribarren, C. R., & Nogales, C. M. (1949). Protection des ports. In *PIANC congress 1949 SII-C4*

- (pp. 180–193).
<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?9401349%5Cnhttp://repository.tudelft.nl/view/hydro/uuid:7ab718ff-a74d-4141-8c3f-413044c751c4/>
- Kinsman, B. (1965). Wind Waves: Their generation and propagation on the ocean surface. *Prentice Hall*, 2, 137–138.
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 4243–4247.
- Komar, P. D., & Holman, R. A. (1986). Coastal processes and the development of shoreline erosion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences. Vol. 14*, 237–265.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.001321>
- Kraus, N., Larson, M. and Kriebel, D. (1991). Evaluation of beach erosion and accretion predictors. *Coastal Sediments*, 572–587.
- Mario, C. F., Luis, O., Restrepo, J. C., & Juan, C. O. (2017). Experimental analysis of infragravity waves in two eroded microtidal beaches. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(5), 31–43.
<https://doi.org/10.1007/s13131-017-1054-7>
- Massel, S. (1996). Ocean surface waves: Their physics and prediction. *Advances Series on Coastal Engineering*, 491.
- Massel, S. (2001). Wavelet analysis for processing of ocean surface wave records. *Ocean Engineering*, 957–987.
- Masselink, G. (1995). Group bound long waves as a source of infragravity energy in the surf zone. *Continental Shelf Research*, 15(13), 1525–1547.
- Montaño Muñoz, J. K. (2015). *Influence of infragravity waves on the hydrodynamics of beaches*. 100. <http://www.bdigital.unal.edu.co/51266/>
- Newland, D. (1984). An introduction to random vibrations and spectral analysis. *Longman Group Limited*, 213–219.
- Ochi, M. (1998). Ocean waves: The stochastic approach. *Cambridge Ocean Technology*, 319.
- Phillips, O. (1977). The dynamics of the upper ocean. *Cambridge University Press*, 336.
- Pierson, W. J., & Marks, W. (1952). The power spectrum analysis of ocean-wave records. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 33(6), 834–844.
<https://doi.org/10.1029/TR033i006p00834>
- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología De Colombia : Una Síntesis Desde La Escala Inter-Decadal hasta la Escala Diurna. *Ciencias de La Tierra*, 201.
- Putnam, J.A. and Johnson, J. W. (1949). The dissipation of wave energy by bottom friction. *American Geophysical Union*, 30(1), 67–74.
- Restrepo, J. C., Otero, L., Casas, A. C., Henao, A., & Gutiérrez, J. (2012). Shoreline changes between 1954 and 2007 in the marine protected area of the Rosario Island Archipelago

- (Caribbean of Colombia). *Ocean and Coastal Management*.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.07.027>
- Ricaurte-Villota, C., & Bastidas-Salamanca, M. L. (2017). Regionalización oceanográfica, una visión dinámica del Caribe. In *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andréis (INVEMAR). Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 14*.
- Rice, S. O. (1944). Mathematical Analysis of Random Noise. *Bell System Technical Journal*, 23(3), 282–332. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1944.tb00874.x>
- Ruiz-Merchán, J., Otero, L., Conde, M., Restrepo, J. C., & Ortiz, J. C. (2019). Field Observations of Wave and Current Characteristics on a Microtidal Reflective Beach. *Journal of Coastal Research*, 35(6), 1164–1184. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00120.1>
- Shin, S., Cox, D. and Yoon, D. (2014). Numerical modeling of surf zone hydrodynamics over movable bed. *Journal of Coastal Research*, 139–144.
- Silva-Casarín, R., Lacouture, M., Durón, F., Pedroza-Paez, D., Pérez, M. A., Baldwin, E., Calzadilla, M., Escudero, M., Félix, A., & Cid, A. (2011). *Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*.
- Silva Casarín, R., Martínez, M. L., Moreno-casasola, P., Mendoza Baldwin, E., López-portillo, J., Lithgow, D., Martínez Martínez, R. E., Monroy Ibarra, R., Cáceres Puig, J. I., Ramirez Hernández, A., & Boy Tamborrell, M. (2017). Aspectos generales de la zona costera. In *Inecol* (Vol. 1, Issue January).
- Sonu, C. J. (1968). Collective movement of sediment in litoral environment. *Coastal Studies Institute*, 401–418. <https://doi.org/10.2307/j.ctvfxvccj.28>
- Symonds, G.;Ranasinghe, R. (2000). On the formation of rip currents on a plane beach. *27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*.
- Symonds, G., Huntley, D. A., & Bowen, A. J. (1982). Long Wave Generation by a Time-Varying Breakpoint. *Journal of Geophysical Research*, 87(1), 492–498.
- Tolman, H. L. (n.d.). *WAVEWATCH III® Model*.
- Torrence, C, and Compo, G. (1998). A practical guide to wavelet anlysis. *Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado*, 49–57.
<https://doi.org/10.4324/9780429311369-6>
- Vidal, C., Losada, M.A., Medina, R. and Losada, I. (1995). Modelos de morfodinámica de playas. *Ingeniería Del Agua*, 55–74.
- Winter, G., Lowe, R., Symonds, G., Hansen, J. and van Dongeren, A. (2017). Standing infragravity waves over an alonshore irregular rocky bathymetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 2647–2651. <https://doi.org/10.1002/2016JC012242>.Received
- Wright, L. D., & Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1–4), 93–118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)

Zijlema, M., Stelling, G., and S. P. (2011). Simulating nearshore wave transformation with non-hydrostatic wave-flow modelling. *Delft University of Technology*, 1-11